INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN



TOPOLOGIA DE LOS ESPEJISMOS

Agosto 1985

400 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 107
Agosto 1985



INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR Francisco Gracia Guillén
REDACCION José María Valderas Gallardo (Redactor Jefe)
Carlos Oppenheimer
José María Farré Josa
PRODUCCION César Redondo Zayas
PROMOCION EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (ESPAÑA)

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

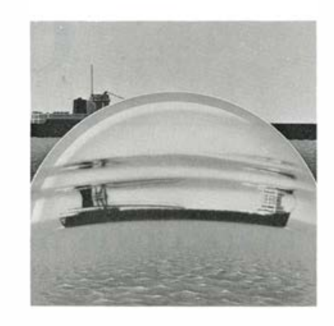
Mireia Bofill Abelló: *La elección de tecnología*; Santiago Torres Martínez: *Función inmunológica de la piel*; Manuel Puigcerver: *Cúmulos globulares*; Pascual Rivas Carrera: *Los primeros organismos*; Joandomènec Ros Aragonés: *Ecología social de los chimpancés*; Amando García Rodríguez: *Topología de los espejismos*; Stella M. Alabarcez: *Sifones en los acueductos romanos*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Ciencia y sociedad:

Fernando López Vera, Raimundo Jiménez Ballesta, Sebastián Muñoz Guerra y José María Fernández Santín

Libros:

A. Albarracín, R. Margalef, M. de Guzmán y A. Argandoña



LA PORTADA

La figura de la portada representa una fase de la visualización de la relación topológica entre la imagen no deformada de un objeto y la imagen de su espejismo. El espejismo de un barco de carga de mineral en los Grandes Lagos se reproduce en la superficie de una "esfera imagen" imaginaria y flexible. La imagen del carguero sin deformar se ve al fondo de la figura, reproducida sobre una "esfera objeto" cuyo tamaño es mucho mayor. La relación entre ambas imágenes viene dada por una operación topológica conocida como proceso de transferencia (véase "Topología de los espejismos", por Walter Tape, en este mismo número). En un proceso de transferencia, la esfera imagen se deforma de tal modo que la imagen representada en ella aparece sin deformar: la esfera imagen se expande hasta coincidir con la esfera objeto y, a medida que se produce esta expansión, se arruga y se pliega. En ocasiones, la imagen de su superficie coincide con la imagen sin deformar representada en la superficie de la esfera objeto.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números): 4400 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 33 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
400 pesetas
Ejemplar atrasado extraordinario:
500 pesetas

Distribución para España:
Distribuciones de Enlace, S. A.
Bruch, 49 - 08009 Barcelona

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137 - 28030 Madrid
Teléfonos 430 84 81 - 437 12 91
Cataluña:
Lourdes Padrós
Manuel Girona, 61, 2.º - 08034 Barcelona
Teléfono 204 45 83

Controlado por O.J.D.



PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Hank Iken

Página	Fuente
8-17	Jerome Kuhl
19	Tung Tien-Sun, Universidad de Nueva York
20-22	Ilil Arbel
23-24	Richard L. Edelson, Facultad de Medicina y Cirugía de la Universidad de Columbia
25	Ilil Arbel
29-33	Ricardo Génova y Fernando Estivariz
34	Fernando Estivariz; cortesía de César L. A. Gómez Dumm, Facultad de Ciencias Médicas de la Universidad Nacional de la Plata
35-37	Ricardo Génova y Fernando Estivariz
38	S. Muñoz-Guerra y J. M. Fernández Santín
40	F. López Vera y R. Jiménez Ballesta
43	© 1983 Instituto de Tecnología de California (*arriba*); Ivan R. King, Universidad de California en Berkeley (*abajo*)
44-47	Ian Worpole
48	Stanislav Djorgovski, Universidad de California
49	Ivan R. King
55	W. D. Keller, Universidad de Missouri en Columbia (*izquierda*), David W. Houseknecht, Universidad de Missouri en Columbia (*derecha*)
56-59	George V. Kelvin
60	W. J. McHardy, Instituto Macaulay de Edafología (*arriba*); W. D. Keller (*abajo*)
61	W. D. Keller
62	Naganori Yoshinaga, Universidad Ehime
65	Constance S. Ghiglieri
66-70	Patricia J. Wynne
72-73	Walter Tape, Universidad de Alaska en Fairbanks
74-75	Hank Iken, Walken Graphics
76	Walter Tape (*arriba*); Hank Iken, Walken Graphics (*abajo*)
77-78	Walter Tape
81	A. Trevor Hodge, Universidad de Carleton, Ottawa
82-84	Tom Prentiss
86	A. Trevor Hodge
88-92	Andrew Christie
94-98	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Pedro IV, 160 - 08005 Barcelona
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Imprime GRAFESA
Gráfica Elzeviriana, S.A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
08013 Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

WASSILY LEONTIEF ("La elección de tecnología") es profesor de economía de la Universidad de Nueva York y director del Instituto de Análisis Económico. Licenciado por la Universidad de Leningrado en 1925, se trasladó a la de Berlín para recibirse de doctor. Fue luego, durante un año, asesor del ministro de ferrocarriles del gobierno chino de Nanking. En 1932, poco después de trasladarse a los Estados Unidos, se incorporó al claustro docente de la Universidad de Harvard. Desarrolló entonces el método del análisis económico *input-output*, que describió en su obra *Input-Output Economics*. En 1975 abandonó la Universidad de Harvard para incorporarse a la de Nueva York. Leontief recibió el premio Nobel de economía en 1973; en 1984, el gobierno japonés le concedió la Orden del Sol Naciente por su contribución a la formulación de una política económica eficaz para ese país, cuyos resultados están a la vista.

RICHARD L. EDELSON y JOSEPH M. FINK ("Función inmunológica de la piel") iniciaron su colaboración en el estudio del papel inmunológico de la piel en 1983. Edelson es profesor y director de investigación del departamento de dermatología de la Facultad de Medicina y Cirugía de la Universidad de Columbia, donde se encarga también del centro de investigación clínica general del Hospital Presbiteriano del lugar. En 1966 completó el primer ciclo universitario en el Hamilton College, interesándose por la inmunología durante su paso por la Facultad de Medicina de la Universidad de Yale. Tras licenciarse, en 1970, realizó un internado en la Facultad de Medicina Pritzer, de la Universidad de Chicago. Se especializó en dermatología en el Hospital General de Massachusetts. Lo contrató la facultad de la Columbia en 1975. Fink cursó estudios en el Brooklyn College, de la Universidad de la ciudad de Nueva York. En 1983 se licenció por la Escuela de Cirugía Dental y Bucal de la Universidad de Columbia. En esa institución se interesó por los mecanismos inmunológicos implicados en las enfermedades peridentales. Las semejanzas entre el epitelio bucal y la piel le llevó a investigar las funciones inmunológicas de la piel, siendo becario postdoctoral en el laboratorio de Edelson. Fink trabaja actualmente en el departamento de periodontología de la Universidad de Columbia.

FERNANDO ENRIQUE ESTIVARIZ ("ACTH y su familia de péptidos") investiga en el Centro de Estudios Endocrinos de la Facultad de Ciencias Médicas de la Universidad Nacional de La Plata, donde dirige un grupo dedicado al estudio de las relaciones bioquímicas y fisiológicas del eje hipotálamo-hipófiso-adrenal. Es jefe de trabajos prácticos de la cátedra «B» de embriología e histología de la casa de estudios mencionada. Pertenece al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina. En 1973 se licenció en ciencias bioquímicas en la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de La Plata, donde, en 1977 obtuvo el doctorado. Entre 1977 y 1979 trabajó en el laboratorio de péptidos hipofisarios del hospital Saint Bartholomews en Londres.

IVAN R. KING ("Cúmulos globulares") enseña astronomía en la Universidad de California en Berkeley. Cursó estudios en el Hamilton College, doctorándose por Harvard en 1952. Después de servir en la Armada de los Estados Unidos y de trabajar en el Departamento de Defensa, firmó un contrato con la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. Pasó allí ocho años, trasladándose a Berkeley en 1964. Durante los últimos años, en calidad de miembro del Grupo Europeo de la Cámara para Objetos Débiles, King se ha ocupado de la preparación de las observaciones a realizar con el Telescopio Espacial, cuyo lanzamiento está previsto para 1986.

A. G. CAIRNS-SMITH ("Los primeros organismos") es profesor de química orgánica e historia de la química de la Universidad de Glasgow. Se licenció (1954) y doctoró en química orgánica (1957) por la Universidad de Edimburgo. Al poco de doctorarse se incorporó al claustro docente de Glasgow. Fruto de sus investigaciones sobre arcillas y acerca de las primeras moléculas orgánicas es el libro *Genetic takeover and the mineral origins of life*. Ultimamente, Cairns-Smith se ha interesado por el estudio de las formaciones primitivas de hierro bandeado sedimentario y por su posible relación con los procesos fotosintéticos registrados en los mares precámbricos.

MICHAEL P. GHIGLIERI ("Ecología social de los chimpancés") es un biólogo de campo y especialista en el comportamiento de los primates. Se formó en la Universidad estatal de California en Hayward, por la que se licenció en 1973; en su tesina aborda el comportamiento de gorilas de llanura en cautividad. Se doctoró en 1979 por la Universidad de California en Davis, con el estudio que recoge este número de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA. Durante su carrera universitaria y posteriormente efectuó trabajos de campo y campañas fluviales en zonas vírgenes o poco conocidas de Turquía, Etiopía, Kenia, Ruanda, Tanzania, Papúa-Nueva Guinea, Indonesia y los Estados Unidos. En 1984, Ghiglieri publicó *The Chimpanzees of Kibale Forest*.

WALTER TAPE ("Topología de los espejismos") es profesor adjunto de matemáticas de la Universidad de Alaska en Fairbanks. Comenzó su carrera en la Universidad de Princeton, defendiendo su tesis doctoral en la de Michigan. Su interés, tanto profesional como recreativo, se centra en la óptica meteorológica, que comprende fenómenos tales como el arco iris y los espejismos. Comenta el propio Tape que esos fenómenos "me atraen tanto por su belleza natural como por las ideas matemáticas que llevan asociadas. Me gusta fotografiarlos, en parte por motivos científicos y en parte por la atracción que supone la caza: siempre espero captar algún fenómeno raro".

A. TREVOR HODGE ("Sifones en los acueductos romanos") enseña clásicas en la Universidad de Carleton, Ottawa. Nació en Belfast y estudió en Cambridge, centro por el que se licenció y doctoró en arqueología. Su tesis la publicó, en 1960, Cambridge University Press, bajo el título *The Woodwork of Greek Roofs*. Impartió clases en las Universidades de Standford, Cornell y Pennsylvania, incorporándose a la facultad de Carleton en 1960. Hodge ha investigado especialmente sobre el tema de los acueductos romanos y la colonización griega en el sur de Francia.

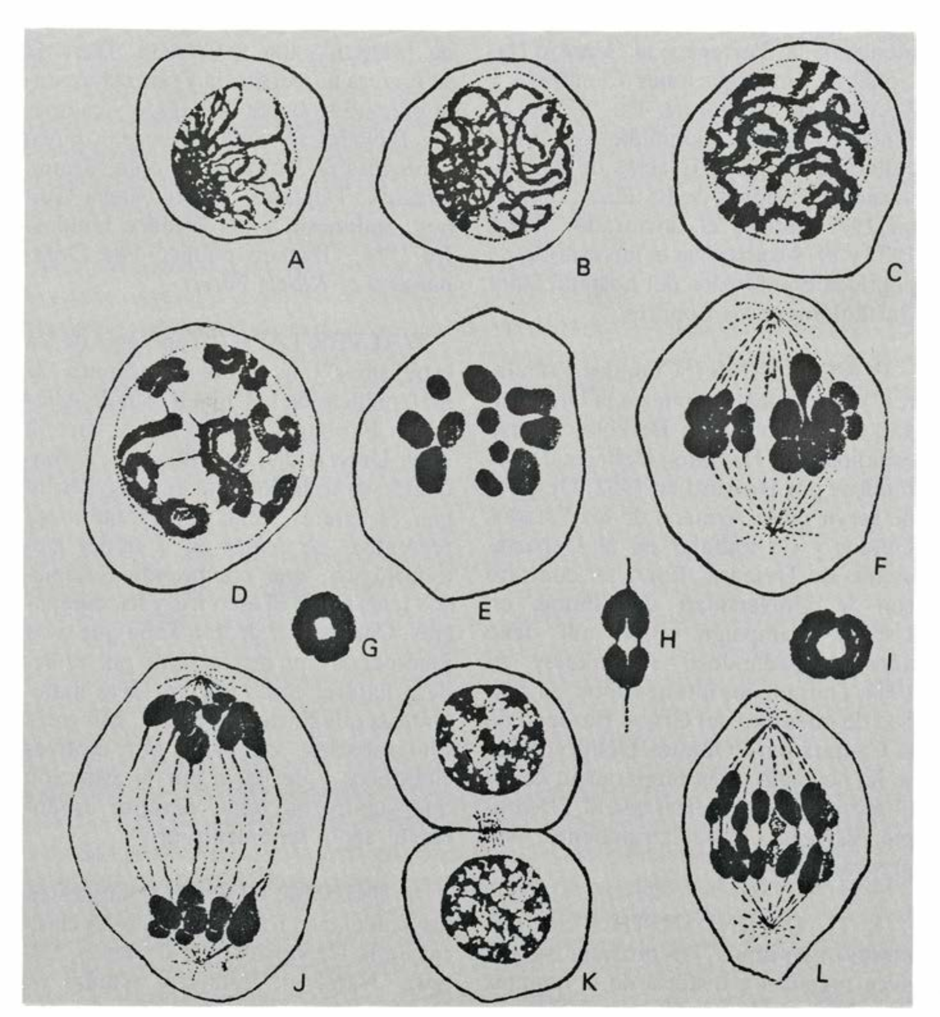
Hace...

José M.ª López Piñero

... cincuenta años

La Junta para Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas publicó la segunda edición, "corregida y considerablemente aumentada", de *La herencia mendeliana*, de José Fernández Nonídez, libro que constituye un hito fundamental en el desarrollo de la moderna genética en España.

La biografía y la obra de José Fernández Nonídez (1892-1947) no habían sido debidamente estudiadas hasta la tesis doctoral que Félix Carbonell Ramón ha dedicado recientemente a la introducción de la genética mendel-morganiana en nuestro país. Discípulo de Ignacio Bolívar, Nonídez se formó científicamente como miembro del grupo que éste encabezó en el Museo de Ciencias Naturales, de Madrid, integrado principalmente por investigadores dedicados a trabajos sobre animales inferiores. Comenzó realizando estudios descriptivos, entre los que destaca el titulado *Pseudoescorpiones de España* (1917). Muy pronto, sin embargo, se interesó por la genética, siendo sus primeras publicaciones sobre la materia la monografía *Los cromosomas en la espermatogénesis del "Blaps lusitanica"* (1914), el artículo *Los cromosomas goniales y las mitosis de maduración en "Blaps lusitanica" y "B. walti"* y la revisión de conjunto *Ideas actuales sobre determinación del sexo* (1917). En esta última fecha, siendo catedrático de zoología en la Universidad de Murcia, la Junta para Ampliación de Estudios le concedió una beca para estudiar junto a Thomas Hunt Morgan. Su estancia en el departamento de zoología de la Universidad de Columbia, bajo la dirección del propio Morgan y de Edmund Beecher Wilson, le permitió cultivar la investigación genética de forma más rigurosa y al día. De regreso a España, en el verano de 1920, publicó varios trabajos de investigación, los más importantes de los cuales fueron uno sobre el cromosoma accesorio en la espermatogénesis del *Asilus vulcatus*, en el *Boletín de la Sociedad Española de Historia Natural*, y otro acerca de la espermatogénesis del *Asilus sericeus*, en el *Journal of Experimental Zoology*. Por otra parte, dio en el Museo de Ciencias Naturales, de Madrid, un ciclo de conferencias que fue la base de la primera edición de su libro *La herencia mendeliana* (1922). El siguiente año apareció otra obra suya de síntesis, titulada *Variación y herencia en los animales domésticos y las plantas cultivadas*. Ambos libros contribuyeron decisivamente a la difusión en España de la nueva genética, en las mismas fechas en que iniciaban su actividad científica otros cultivadores españoles de la disciplina, algunos de tanto relieve como el biólogo Antonio de Zulueta Escolano y la médica Jimena de la Vega.

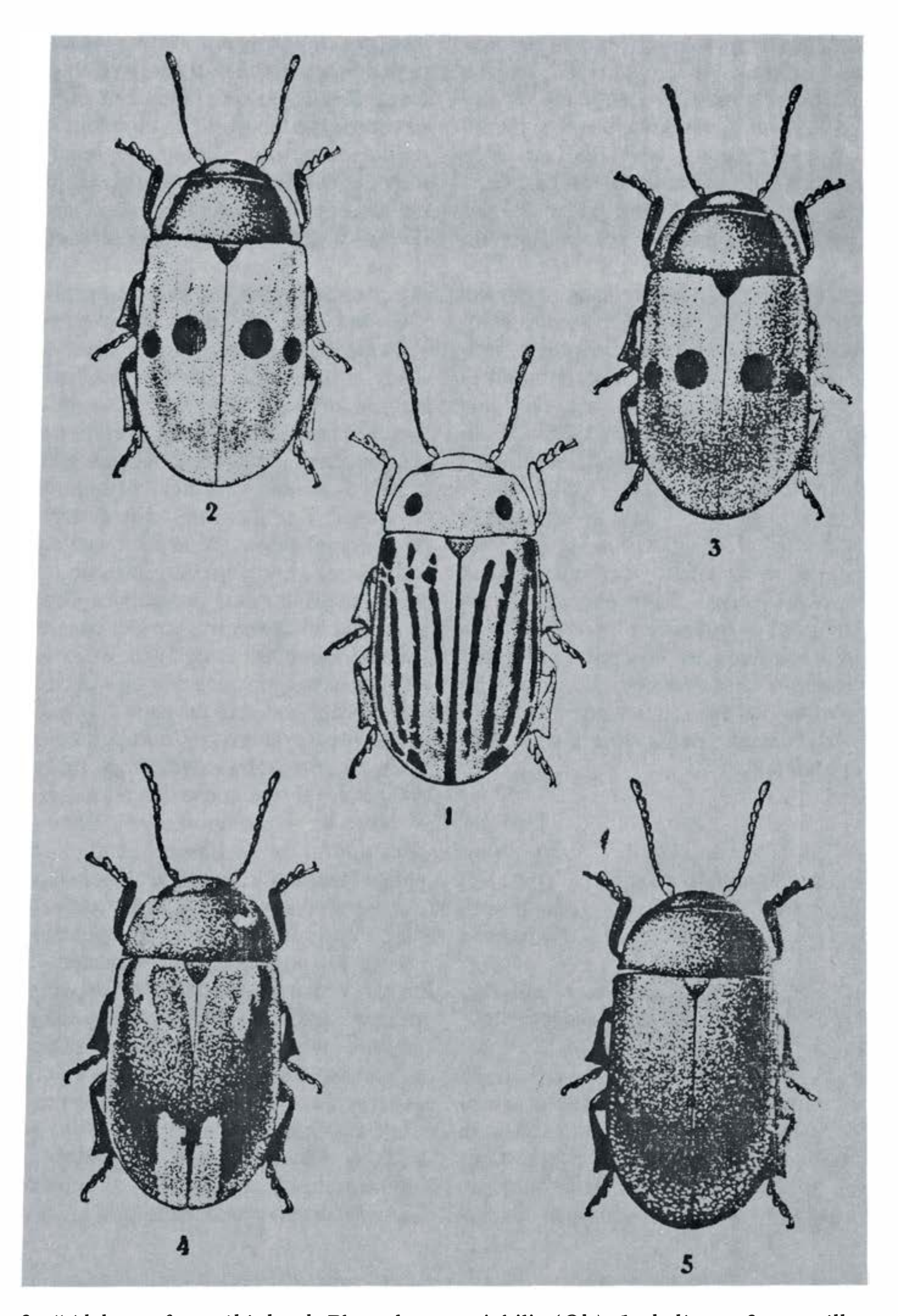


1. "Estados postsinápticos y divisiones madurativas de los espermatocitos del sapo Bufo *(número diploide, 22 cromosomas). A, fase de la sinapsis con contracción de los cromosomas (*sinizesis*); B, los cromosomas bivalentes se diseminan por el núcleo (*estado paquiténico*); C, cromosomas más gruesos y cortos, con hendidura que representa el plano de su asociación en parejas (*estado diploténico*); D, formación de las tétradas en la profase de la primera división madurativa; E, vista polar de la placa ecuatorial de la primera mitosis madurativa, con 11 tétradas; F, anafase temprana, vista de lado; separación de los miembros de cada pareja; G, H, I, diversas formas de tétradas; J, anafase tardía en la división reductora; K, telofase de la misma (formación de los espermatocitos secundarios); L, segunda mitosis de maduración (ecuacional), vista de lado." Figura del libro de Nonídez* La herencia mendeliana, *copiada de una preparación del propio autor.*

En la segunda edición de *La herencia mendeliana*, Nonídez actualizó y amplió, como hemos dicho, el contenido de su libro. Incorporó no sólo los progresos de la investigación internacional, sino también las contribuciones españolas, en especial las de Zulueta, y también las de F. Galán, M. Bordás y las suyas propias. Entre dichas contribuciones figura un trabajo de Zulueta en torno a la herencia ligada al sexo en el coleóptero *Phytodecta variabilis*: "Otro ejemplo interesante de genes contenidos en el cromosoma Y es el descrito por Zulueta en el coleóptero *Phytodecta variabilis*. La presencia de

un par de cromosomas desiguales en esta especie ha sido demostrada por Galán, a quien debemos un estudio muy completo de su espermatogénesis. Según se indicó, los diversos tipos de coloración y manchas de *Phytodecta* constituyen una serie de alelomorfos múltiples (figura 2) cuyo orden de dominancia es: negro, rojo, amarillo, de líneas. El fenotipo negro aparece con dos aspectos: negro uniforme, o negro y rojo o amarillo. Los cruzamientos de estos diversos fenotipos han demostrado que los genes pueden estar localizados tanto en el cromosoma X como en el Y, a semejanza de lo que ocurre en *Lebistes* y *Aplocheilus*.

"En la figura 3, tomada de Zulueta, puede verse gráficamente la transmisión de un macho negro heterozigótico (X_NY_A) con una hembra negra homozigótica (X_NX_N). Como el negro resulta dominante sobre el amarillo, este último color no se manifiesta. Tampoco se hace patente en ninguno de los descendientes de las F_1 y F_2, pues el cromosoma Y_A va siempre acompañado de X_N, que enmascara su efecto. Todos los descendientes, tanto los machos como las hembras son, pues, negros en ambas generaciones, y pudiera creerse que se trata de un cruzamiento de dos individuos negros homozigóticos en los cuales el cromosoma Y no lleva factor alguno. Sin embargo, el cruzamiento de un macho negro con una hembra de líneas (X_LX_L; línea 7) permitió demostrar el heterozigotismo del macho negro, toda vez que originó hembras negras y machos amarillos en la misma proporción. La explicación de este resultado es sencilla: Siendo el gene de líneas recesivo cuando se combina con el amarillo, el factor contenido en el cromosoma Y, recesivo en el macho negro, se transforma ahora en dominante, por cuya causa se manifestarán sus efectos, pero sólo en los machos, por ser los únicos que reciben dicho cromosoma." [*Véase la figura 5.*]



2. *"Alelomorfos múltiples de* Phytodecta variabilis *(Ol.): 1, de líneas; 2, amarillo; 3, rojo; 4 y 5, negro." Dibujo de Zulueta reproducido en* La herencia mendeliana, *de Nonídez.*

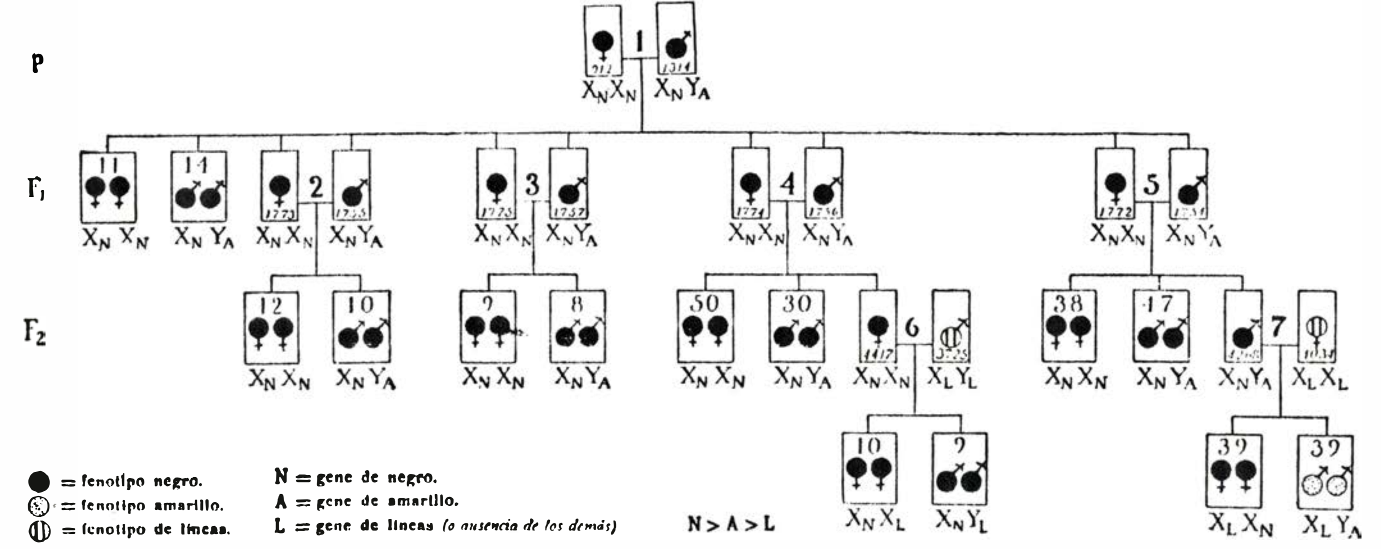
"El ejemplo citado demuestra no sólo la localización de un gene en el cromosoma Y, sino también la posibilidad de comprobar su presencia, mediante cruzamiento adecuado, en el caso en que su efecto no se haga patente por ir dominado por otro gene de la misma serie alelomórfica."

Nonídez se ocupó asimismo en su libro de la técnica de los experimentos genéticos en las plantas y los animales. Como discípulo de Morgan, resulta lógico que ofreciera una amplia exposición sobre el cultivo de la mosca *Drosophila melanogaster*, que comienza de la siguiente forma: "Por su importancia científica hemos de consignar aquí los métodos empleados por Morgan y sus colaboradores en el cultivo de la mosca *Drosophila melanogaster* Loew, con la cual se han obtenido tan sorprendentes resultados para el esclarecimiento de los fenómenos íntimos de la herencia mendeliana. Este pequeño díptero es cosmopolita y puede capturarse fácilmente sin más que dejar al aire libre en un frasco abierto plátanos muy maduros o fermentados, que atraen no sólo a esta especie, sino a otras afines, las cuales depositan sus huevecillos en los plátanos, asegurando abundante progenie en caso de escapar. De los huevos nacen pequeñas larvas, cuyo desarrollo es rápido, y al cabo de unos seis a siete días, si la temperatura es favorable, comienzan a abandonar el medio que les ha servido de alimento para transformarse en ninfas inmóviles, de las cuales emerge seguidamente el insecto adulto. Al abandonar la cubierta ninfal, las moscas presentan los tegumentos muy blandos y pálidos, a excepción de los ojos, y las alas aparecen plegadas, no tardando en extenderse por completo. Los machos y las hembras se distinguen fácilmente. Los primeros (fig. 4, A) son

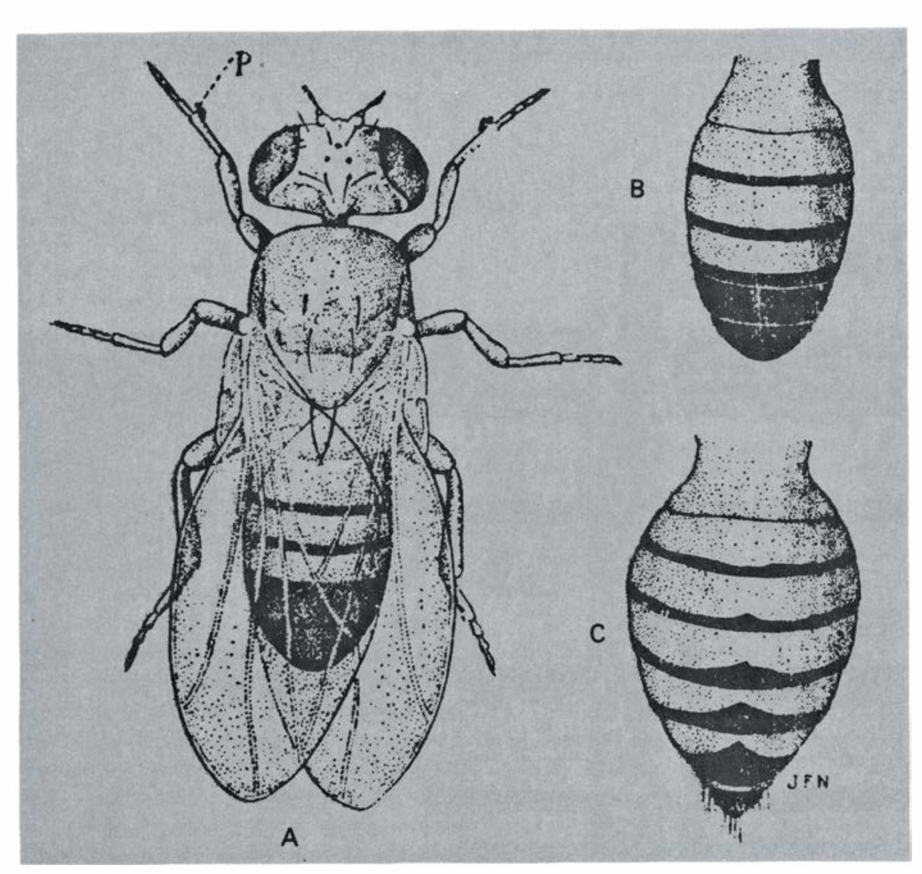
algo más pequeños y presentan el abdomen redondeado posteriormente (B); los últimos anillos abdominales son negros. Además, el macho posee el llamado *peine sexual* (p), una hilera de cerditas negras en el extremo anterior de la tibia del primer par de patas. En las hembras el abdomen es puntiagudo posteriormente (C); los últimos anillos abdominales presentan color negro tan sólo en el borde posterior, contrastando de este modo con el color negro uniforme de los anillos correspondientes del macho. La hembra carece de peine sexual. *Drosophila* puede criarse fácilmente en el laboratorio, utilizando como alimento una masa de pulpa de plátano mezclada con agar-agar, a la cual se añade un poco de levadura de pan para producir la fermentación. A consecuencia del coste elevado de los plátanos o bananas en los países de la zona templada, se han ensayado otros alimentos más baratos. El empleado actualmente en el laboratorio del profesor Morgan consta de los siguientes ingredientes:

Agua .... 75,0 cm^3
Melaza (libre de SO_2) .... 13,5 cm^3
Harina de maíz (granular, amarilla) .... 10,0 gramos
Agar-agar .... 1,5 gramos

"Se disuelve el agar en el agua, calentando y agitando al mismo tiempo, añadiendo la melaza y finalmente la harina hasta obtener un líquido espeso. El alimento así preparado se vierte caliente en frascos, formando una capa en el fondo de unos 2,5 centímetros de espesor. Una vez frío, se espolvorea con levadura de pan, para producir la fermentación, y se introduce un pedazo de papel de filtro, sobre el cual se transformarán las larvas en ninfas. Los frascos se conservan tapados con algodón, que no deberá apretarse, sino simplemente introducirse en la boca del frasco, para evitar la huida de las moscas o la entrada de las que suelen pulular alrededor de los cultivos buscando ocasión propicia para depositar sus huevos en ellos. De esta "infección" debe uno precaverse cuidadosamente, pues, de tener lugar, introduciría graves errores en la interpretación de los resultados de los experimentos. En vez de algodón pueden emplearse caperuzas de cartón con numerosas perforaciones, hechas con una aguja fina, para permitir el acceso del aire. El diámetro de estos agujeros deberá ser muy pequeño, pues de otro modo podrían pasar las moscas. Como la temperatura óptima para el desarrollo de *Drosophila* es de 23° a 24° centígrados, será indispensable en el invierno guardar los frascos en un armario calentado por dos o tres bombillas eléctricas, y aún podrá añadirse un termorregulador si se temiese una temperatura elevada. Al comenzar un cultivo se depositarán en un frasco con alimento recién preparado una pareja de moscas; como en el frasco que se destinó a atraparlas pudiera haber otras especies, con el fin de facilitar la selección, lo mejor será anestesiarlas. Esto se consigue por medio del éter, y la anestesia se impone cada vez que se desea inspeccionar los individuos producidos en una generación; de otro modo sería imposible examinar los pequeños detalles. Para la anestesia se transportarán a otro frasco, en cuyo corcho o tapón se ha sujetado un pedazo de algodón, que se empapará en éter. Las moscas no deben tocar dicho algodón, pues se corre riesgo de matarlas. El transportar las moscas de un frasco a otro es empresa fácil en virtud de su tendencia a congregarse en la zona más iluminada de aquellos. La anchura de la boca de los frascos deberá ser la misma. Para conseguir el paso de las moscas desde el frasco de cultivo al destinado para la anestesia, se mantendrá aquél en posición horizontal, con el fondo vuelto hacia la luz de una ventana o lámpara; las moscas se dirigirán a esta región más iluminada, abandonando las proximidades de la boca del frasco. Cuando esto suceda, se retirará el tapón de algodón, aplicando la boca del frasco de anestesia; después se invierte la posición de ambos frascos –siempre en el plano horizontal–, dirigiendo el fondo del destinado a la anestesia hacia el foco luminoso para que penetren en él las moscas, atraídas por la luz. Una vez hecho esto, se tapan ambos frascos: el de cultivo con el algodón y el destinado a la anestesia con su tapón, cuyo algodón se habrá humedecido previamente con éter. Las moscas, al encontrarse en una atmósfera de éter, comienzan a revolotear, pero bien pronto caen al fondo del frasco. Es necesario no prolongar la anestesia, que acaba por causar la muerte del individuo, reconociéndose este estado por la separación de las alas, que tienden a situarse separadas del cuerpo en un plano horizontal, o levantarse sobre el dorso del animal. Una mosca anestesiada presenta siempre las alas en la posición normal de reposo. Para examinar las moscas se empleará una lente de fuerte aumento, un microscopio de los llamados de di-



3. "Transmisión del gene amarillo por el cromosoma Y del coleóptero Phytodecta variabilis.*" Esquema de Zulueta reproducido en* La herencia mendeliana, *de Nonídez.*



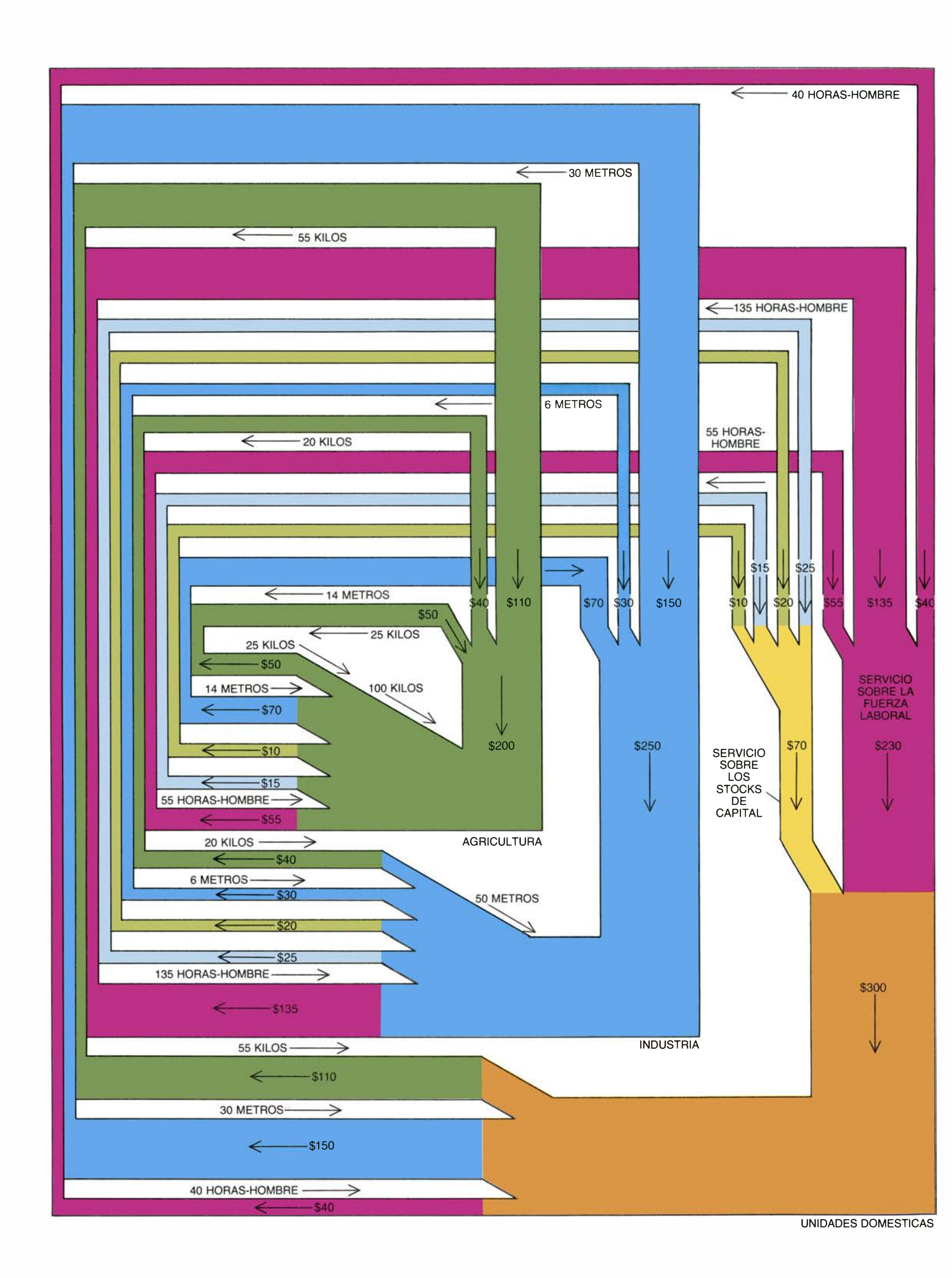
4. "A, macho de la mosca Drosophila melanogaster*; B, abdomen del macho y C, abdomen de la hembra, ambos vistos por encima; p, peine sexual, existente solamente en el macho." Grabado de* La herencia mendeliana, *de Nonídez, que corresponde a un dibujo del propio autor.*

sección o, aún mejor, un microscopio binocular; la iluminación deberá ser buena. Invirtiendo el frasco sobre la platina del microscopio –previamente cubierta con un trozo de papel o de loza blanca–, se estudiarán las moscas individualmente, manejándolas mediante un pincel fino u otro instrumento que no pueda causarles lesión alguna. Cuando las moscas son muy numerosas o el examen es muy detenido, los efectos de la anestesia cesan pronto y comienzan a moverse agitando vertiginosamente las alas, emprendiendo el vuelo al menor descuido. Para evitar esto suele usarse una tapa de cristal o platillo, el cual lleva pegado en su fondo una tira de papel de filtro que se humedece con éter, colocándole invertido sobre las moscas hasta que éstas vuelvan a anestesiarse. Una vez seleccionadas las moscas que se desea aparear, se depositarán, empujándolas con un pincel, en un pequeño cucurucho de papel, que se introduce abierto en un frasco de cultivo; las moscas no deben caer al fondo del frasco, pues como el alimento presenta consistencia gelatinosa se adhieren a él por medio de las alas, sin poder desprenderse, muriendo al poco tiempo. Al cabo de unos quince minutos los efectos de la anestesia han pasado por completo y vuelan cual si nada hubiera interrumpido su actividad."

En 1921, Nonídez fue nombrado profesor de anatomía en la Cornell University. Con escasas interrupciones, permaneció el resto de su vida en los Estados Unidos, dedicado preferentemente a la embriología y a la anatomía microscópica. Publicó, entre otras obras, un excelente manual de histología (1941) que alcanzó varias ediciones.

P	♂ negro heteroz.	×	♀ de líneas
	$X_N Y_A$		$X_L X_L$
Gametos	$X_N Y_A$		$X_L X_L$
F_1	♀ negra heteroz.		♂ amarillo heteroz.
	$X_N X_L$		$X_L Y_A$

5. Cruzamiento de un macho negro con una hembra de líneas X_L X_L



40 HORAS-HOMBRE
30 METROS
55 KILOS
135 HORAS-HOMBRE
6 METROS
55 HORAS-HOMBRE
20 KILOS
$15
$25
$40
$110
$70
$30
$150
$10
$20
$55
$135
$40
14 METROS
$50
25 KILOS
25 KILOS
$50
100 KILOS
14 METROS
$70
$200
$250
SERVICIO SOBRE LA FUERZA LABORAL
$230
SERVICIO SOBRE LOS STOCKS DE CAPITAL
$70
$10
$15
55 HORAS-HOMBRE
$55
AGRICULTURA
20 KILOS
$40
6 METROS
$30
50 METROS
$20
$25
135 HORAS-HOMBRE
$135
$300
55 KILOS
INDUSTRIA
$110
30 METROS
$150
40 HORAS-HOMBRE
$40
UNIDADES DOMESTICAS

La elección de tecnología

El eco de una nueva tecnología en el conjunto de la economía genera efectos que no permite vaticinar el examen aislado de cada industria. La introducción de nuevas técnicas podría basarse en datos al alcance de todo el mundo

Wassily Leontief

El director de una acería considera la adquisición de un horno eléctrico que modernizaría el funcionamiento de la fábrica. El nuevo horno aliviaría los costes laborales, pero también consumiría enormes cantidades de electricidad. El director parte del supuesto de que no se producirán variaciones en los costes de la chatarra y otras materias primas, ni tampoco en el precio del acero fabricado. Una comparación de costes, con las condiciones citadas, indica que el alto precio del nuevo horno y del equipo auxiliar no incrementaría, sino que por el contrario reduciría la tasa de rendimiento sobre el capital total invertido.

La decisión del director podría haber sido distinta de haber incluido en su análisis los cambios tecnológicos introducidos en otros sectores de la economía. Supongamos que, simultáneamente a la introducción de hornos eléctricos en la industria siderúrgica, las compañías de electricidad adoptan métodos más eficientes de generación de energía. Al mismo tiempo, supongamos también que la industria del automóvil pasa a producir nuevos modelos que incrementan la demanda de acero de alta resistencia. Estos cambios variarían fácilmente el coste unitario de la energía eléctrica y el precio del acero de alta resistencia. Con lo cual la inversión en el horno eléctrico hubiera resultado rentable.

	AGRICULTURA	INDUSTRIA	UNIDADES DOMESTICAS	TOTAL
AGRICULTURA	25 KILOS	20 KILOS	55 KILOS	100 KILOS
INDUSTRIA	14 METROS	6 METROS	30 METROS	50 METROS
STOCKS DE CAPITAL DE ORIGEN AGRICOLA	50 KILOS	100 KILOS		
STOCKS DE CAPITAL DE ORIGEN INDUSTRIAL	30 METROS	50 METROS		
TRABAJO	55 HORAS-HOMBRE	135 HORAS-HOMBRE	40 HORAS-HOMBRE	230 HORAS-HOMBRE

1. MODELO INPUT-OUTPUT de una economía. Refleja el flujo de bienes y servicios entre los distintos sectores. La economía simple que se representa en el diagrama se divide en tres sectores: agricultura (*verde oscuro*), cuyo producto ("output") se mide en kilos de cosecha; industria (*azul oscuro*), cuyo producto se mide en metros de tela, y unidades domésticas (*naranja*), que consumen los productos finales de la economía, son propietarias de los stocks de capital de la agricultura y la industria y proporcionan fuerza de trabajo medida en horas-hombre (*rojo*). La tabla reproducida arriba incluye, en la correspondiente fila, los outputs de la agricultura, de la industria y de trabajo; la última cifra de la derecha de cada fila indica el producto ("output") total. El input y los stocks de capital necesarios para producir el output total de un sector se consignan en las columnas correspondientes a cada uno de ellos. Por ejemplo, para producir su output total de 50 metros de tela, el sector industrial requiere 20 kilos de cosecha, seis metros de su propio producto, 100 kilos de stocks de capital integrados por productos agrícolas, 50 metros de stocks de capital formados por productos industriales y 135 horas-hombre de trabajo. En el cuadro de la página opuesta el trabajo y los inputs materiales afluyen a cada sector de izquierda a derecha y salen de ellos de abajo arriba. El dinero circula en sentido contrario entre los sectores, siguiendo el movimiento de las manecillas del reloj. El dinero pagado a los inversores del sector doméstico por los otros dos sectores, en concepto de servicios sobre los stocks de capital de origen agrícola, se representa en verde pálido; el dinero pagado por ambos sectores en concepto de servicios sobre el capital de origen industrial se representa en azul celeste. Los rendimientos anuales totales de todas estas inversiones aparecen representados en amarillo. Los flujos se estabilizan a través de sucesivas aproximaciones de las relaciones entre los precios unitarios de las cosechas, la tela y la fuerza de trabajo. Si el coste de la fuerza de trabajo en la economía simple es de 1 dólar por hora y la tasa de rendimiento sobre el capital de un 10 por ciento, las cosechas valdrán dos dólares el kilo y la tela cinco dólares el metro. El ancho de cada canal de flujo del cuadro es proporcional a su caudal en dólares una vez que los precios han alcanzado este equilibrio. La incorporación de un mayor número de sectores permite efectuar análisis más detallados. Las últimas tablas input-output confeccionadas dividen la economía de los Estados Unidos en más de 600 sectores.

Es una lástima que en la vida real muchos empresarios tengan que estudiar sus alternativas de compra desde una perspectiva tan limitada como la del director de nuestro ejemplo. Los directores de empresa de la vida real conocen perfectamente la tecnología en uso y es probable que posean datos fidedignos sobre la tecnología ofrecida para renovar sus instalaciones. Asimismo, la mayoría aceptan la obviedad económica de la propagación de los efectos de cada sector económico a los restantes a través del sistema de precios. Pero, en cambio, saben muy poco sobre las nuevas tecnologías, cuya introducción puede estar considerándose en otras industrias. En consecuencia, la estimación de la repercusión de los costes y beneficios de la nueva tecnología en la propia industria se basa en los diseños y tecnologías en uso en otros sectores en el momento de efectuar el análisis. Suele ignorarse la posible alteración del clima de inversión para la nueva tecnología en la propia industria instada por la introducción de nueva tecnología en otras industrias. A falta de datos adecuados, o de una técnica analítica idónea, poco puede hacerse para remediarlo.

Cincuenta años atrás desarrollé una técnica llamada análisis input-output (también denominado análisis insumo/producto. N. de la T.) que permitía la adopción de decisiones más informadas sobre la introducción de nueva tecnología en cualquier sector económico. Hace dos años, Faye Duchin y yo mismo, con la colaboración de otros siete colegas del Institute for Economic Analysis de la Universidad de Nueva York, reunimos los datos necesarios para aplicar el análisis input-output a las presentes perspectivas de cambio tecnológico. Estos datos describen diversas alternativas posibles de

funcionamiento de la economía norteamericana hasta el año 2000. Se basan en los inputs que requerirá la tecnología que cabe suponer sustituirá a los presentes métodos de producción en los próximos quince años. Con nuestro método no fueron necesarias proyecciones sobre futuras tecnologías desconocidas. Al contrario, la tecnología que consideramos ya se conoce bien, pero su introducción aún no es muy amplia. Los dictámenes de los expertos, de los ingenieros ante todo, y en algunos casos también la experiencia de plantas de reciente construcción en las industrias relevantes, indican que esta tecnología está en condiciones de comenzar a desempeñar un papel dentro de la economía.

Un análisis input-output de cualquier economía en base a estos datos puede reportar dos ventajas fundamentales. Por una parte, indica a cada sector industrial la forma de obtener la máxima tasa de rendimiento posible sobre su capital invertido. Y en segundo lugar, al permitir predecir las opciones que deberá adoptar cada sector para realizar este potencial, el análisis puede facilitar al planificador de la estrategia a seguir una visión panorámica de la futura economía basada en datos empíricos y en el interés directo de los diversos sectores económicos. El gobierno japonés, por ejemplo, ha iniciado recientemente, en colaboración con la industria privada de su país, un análisis de este tipo aplicado al conjunto de la economía nacional. Para estas tareas se desarrolló precisamente el análisis input-output en sus orígenes.

	AGRICULTURA	INDUSTRIA
AGRICULTURA	0,25 KILOS	0,4 KILOS
INDUSTRIA	0,14 METROS	0,12 METROS
STOCKS DE CAPITAL DE ORIGEN AGRICOLA	0,5 KILOS	2 KILOS
STOCKS DE CAPITAL DE ORIGEN INDUSTRIAL	0,3 METROS	1 METRO
TRABAJO	0,55 HORAS-HOMBRE	2,7 HORAS-HOMBRE

a PRECIO UNITARIO DE LAS COSECHAS =
(0,25 KILOS DE INPUT POR KILO PRODUCIDO) × (PRECIO UNITARIO DE LAS COSECHAS)
+ (0,14 METROS DE INPUT POR KILO PRODUCIDO) × (PRECIO UNITARIO DE LA TELA)
+ (0,5 KILOS DE STOCK DE CAPITAL POR KILO PRODUCIDO) × (PRECIO UNITARIO DE LAS COSECHAS) × (10 %)
+ (0,3 METROS DE STOCK DE CAPITAL POR KILO PRODUCIDO) × (PRECIO UNITARIO DE LA TELA) × (10 %)
+ (0,55 HORAS-HOMBRE DE INPUT POR KILO PRODUCIDO) × (PRECIO UNITARIO DE LA FUERZA DE TRABAJO AGRICOLA)

b PRECIO UNITARIO DE LA TELA =
(0,4 KILOS DE INPUT POR METRO PRODUCIDO) × (PRECIO UNITARIO DE LAS COSECHAS)
+ (0,12 METROS DE INPUT POR METRO PRODUCIDO) × (PRECIO UNITARIO DE LA TELA)
+ (2 KILOS DE STOCK DE CAPITAL POR METRO PRODUCIDO) × (PRECIO UNITARIO DE LAS COSECHAS) × (10 %)
+ (1 METRO DE STOCK DE CAPITAL POR METRO PRODUCIDO) × (PRECIO UNITARIO DE LA TELA) × (10 %)
+ (2,7 HORAS-HOMBRE DE INPUT POR METRO PRODUCIDO) × (PRECIO UNITARIO DE LA FUERZA DE TRABAJO INDUSTRIAL)

c PRECIO UNITARIO DE LAS COSECHAS =
1,757 × (PRECIO DE LA FUERZA DE TRABAJO AGRICOLA POR KILO DE COSECHA)
+ 0,383 × (PRECIO DE LA FUERZA DE TRABAJO INDUSTRIAL POR METRO DE TELA) = 2 DOLARES POR KILO

d PRECIO UNITARIO DE LA TELA =
1,351 × (PRECIO DE LA FUERZA DE TRABAJO AGRICOLA POR KILO DE COSECHA)
+ 1,577 × (PRECIO DE LA FUERZA DE TRABAJO INDUSTRIAL POR METRO DE TELA) = 5 DOLARES POR METRO

2. CALCULO DE LOS PRECIOS de los bienes y servicios para una economía de tres sectores. Se postula una tasa anual de rendimiento sobre el capital invertido igual al 10 por ciento; las cifras correspondientes a los inputs materiales y a los stocks de capital de la tabla input-output se dan en unidades de input y de stocks necesarias para cada unidad de producto (output) si se desea mantener un determinado nivel anual de producción. Por ejemplo, la cifra de la primera fila de la segunda columna indica que se necesitan 0,4 kilos de cosecha del sector agrícola por cada metro de tela que produce el sector industrial. Esta cifra se obtiene a partir de la relación empírica de los 20 kilos de cosecha necesarios para producir los 50 metros de tela en la economía representada en la tabla de la figura anterior. Para calcular los precios unitarios de las cosechas y la tela, primero se establece la correspondencia entre cada precio y la suma de los costes de sus inputs. El procedimiento da lugar a dos ecuaciones (*a*, *b*), cada una de las cuales incluye dos incógnitas, a saber, el precio unitario de las cosechas y el precio unitario de la tela. Estas ecuaciones se resuelven más abajo (*c*, *d*) en términos de los costes del trabajo agrícola y del trabajo industrial necesarios por cada unidad de producto. Se supone, además, que los salarios son de 1 dólar por hora en ambos sectores.

Cualquier análisis de un sistema económico que se proponga describir el futuro flujo de bienes y servicios reales en uno y otro sentido debe basarse, en la mayor medida posible, en datos empíricos del momento. Existe un consenso generalizado en cuanto a la profunda influencia de la introducción de ordenadores, máquinas de control numérico por ordenador, robots y sistemas de telecomunicaciones por ordenador, actualmente en curso, sobre la estructura de la economía norteamericana de las próximas dos décadas. Directores de la General Motors Corporation vaticinan, por ejemplo, que en un plazo de dos años el 90 por ciento de todas las nuevas inversiones de capital se efectuarán en máquinas de control numérico por ordenador, susceptibles de ser programadas para seguir una secuencia predeterminada de operaciones de cortado y moldeado del metal. Se anticipa que el mercado de los robots industriales experimentará un crecimiento de entre el 30 y el 40 por ciento anual en los próximos cinco años. Se espera que los ordenadores se hagan cargo de la mayor parte del trabajo rutinario de oficina, sobre todo en industrias como la banca, los seguros, los servicios jurídicos y la administración pública, desplazando con ello a un importante número de empleados.

Nuestro estudio se centró principalmente en los cambios tecnológicos relacionados con la introducción de la automación basada en el uso de ordenadores. No intentamos evaluar los efectos económicos de los cambios tecnológicos previsibles en la agricultura, en virtud de la manipulación genética de los cultivos, en la minería, gracias al perfeccionamiento de los métodos de prospección y recuperación de mineral, o en otros sectores industriales, como re-

sultado de la substitución de los metales por plásticos, cerámicas y fibra de vidrio (véase "Microbiología industrial", INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 1981, y "Mecanización del trabajo", INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 1982).

Consideramos cuatro conjuntos de supuestos diferentes (cuatro "escenarios" por decirlo en el anglicismo al uso) en cuanto al ritmo de introducción en la economía de la automación basada en el uso de ordenadores. En el primer caso, supusimos que no se introduciría ningún tipo de automación u otros cambios tecnológicos desde 1980. Lo que no presupone, sin embargo, una economía estática; en efecto, el modelo proyecta un crecimiento continuado de la demanda de bienes y servicios hasta el año 2000, al mismo ritmo experimentado en los últimos años. Evidentemente, el primer supuesto ya contradice la realidad, pero nos sirve de base de comparación para los otros tres conjuntos de supuestos.

En el segundo y el tercer caso hemos supuesto un incremento cada vez más acelerado de la inversión en automación basada en el uso de ordenadores; en el cuarto caso supusimos una tasa de incremento igual a la del tercero, pero con el postulado adicional de un crecimiento más rápido de la demanda final de ordenadores y productos fundados en los mismos, así como de las demandas intermedias de estos productos. Me limitaré aquí a comentar los resultados de las comparaciones entre el primer conjunto de supuestos, que llamaré la vieja tecnología, y el tercero, que presenta la inversión más acelerada en automación basada en el uso de ordenadores. Por "nueva tecnología" entenderé las tecnologías introducidas en este tercer caso. Para ofrecer una idea general de las diferencias que separan ambos conjuntos de supuestos, bastará señalar que en la década de 1980 la inversión total en ordenadores y robots fue un 15 por ciento superior con la nueva tecnología que con la vieja. En la década de 1990 la inversión total equivalente será un 30 por ciento mayor.

Merece la pena señalar algunos de los cambios tecnológicos que se introducirían bajo nuestro tercer conjunto de supuestos. Una de las posibilidades más llamativas es la importante reducción de fuerza laboral necesaria para producir los mismos bienes con la nueva tecnología, en comparación con la que se requeriría con la vieja. Aunque proyectamos un aumento del empleo con una y otra tecnología, al llegar a 1990 la nueva requeriría aproximadamente unos 11 millones de trabajadores menos que la vieja tecnología. Y hacia el año 2000 esta diferencia sería de 20 millones de trabajadores.

La composición de la fuerza de trabajo también varía con una u otra tecnología. De adoptarse la nueva, en el año 2000 casi el 20 por ciento de la fuerza laboral estaría integrado por profesionales, en tanto que éstos sólo representarían el 14,5 por ciento de la misma con la vieja tecnología. En 1978, los profesionales suponían el 15,6 por ciento de la fuerza laboral. La fracción de éstos en el sector de los servicios en el año 2000 sería un 2 por ciento superior bajo la nueva tecnología que con la vieja, aunque en ambos casos se habría incrementado ligeramente con respecto a 1978.

En el caso de los directivos y administrativos, la tendencia sería inversa. Con la vieja tecnología, los directivos representarían aproximadamente el 11 por ciento de la fuerza de trabajo en el año 2000, y los administrativos sumarían más del 18 por ciento. Con la nueva tecnología, la proporción de directivos sería sólo del 7,2 por ciento, y la de administrativos de sólo el 11,4. En 1978, un 9,5 por ciento de todos los trabajadores ocupaban puestos directivos y un 17,8 por ciento eran administrativos.

Sólo puedo esbozar aquí algunos de los restantes cambios que se producirían con la nueva tecnología. Una diferencia importante sería la menor necesidad de hierro y ciertas aleaciones. Esta reducción se debería en parte a que las máquinas de control numérico por ordenador generan menos chatarra que los trabajadores. Las proyecciones revelan también un incremento significativo en la demanda de metales no ferrosos y una caída de la demanda de pintura. Se estima que la pintura industrial dejada a los robots ahorraría entre un 10 y un 30 por ciento de la que suele necesitar el empleado.

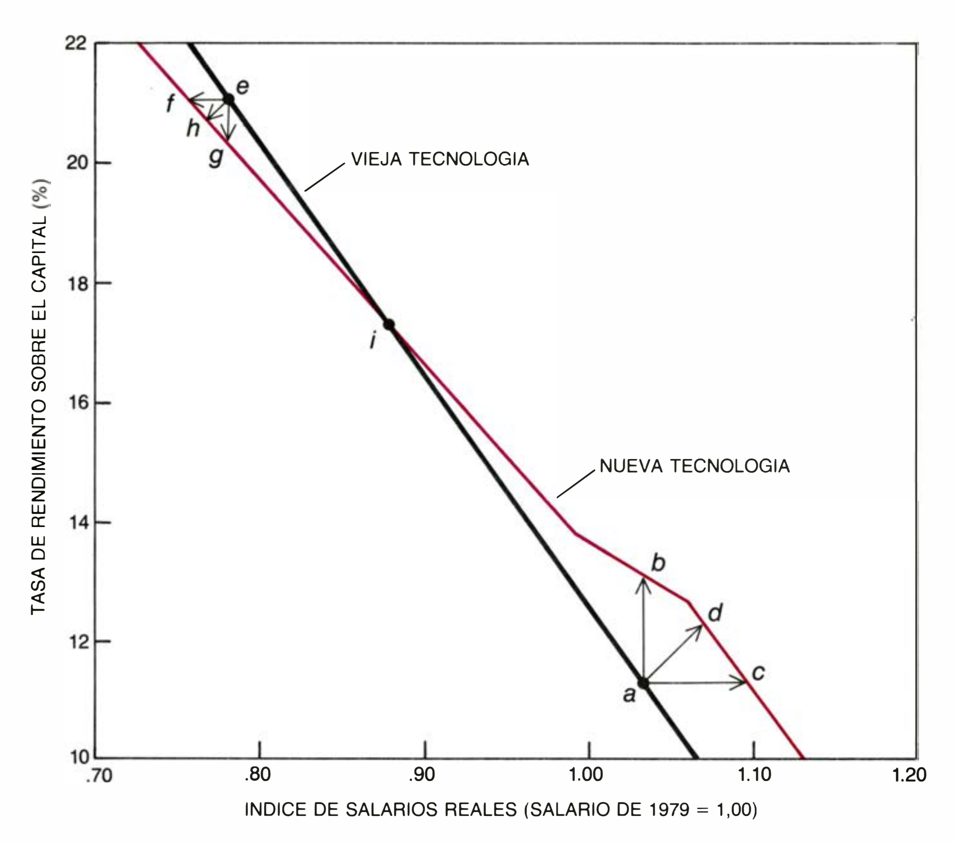
Las industrias con grandes necesidades de procesamiento de datos que operen a través de pequeñas unidades añadirán rápidamente los ordenadores a su stock de capital. Entre ellas cabe citar los comercios y tiendas, las compañías inmobiliarias, los hoteles, los servicios recreativos y educativos. Los ordenadores de mesa y cajas registradoras electrónicas representarán el grueso de estas inversiones.

La forma más refinada de automación que prevemos es el llamado sistema flexible de fabricación. La instalación de este tipo integra varias máquinas de control numérico por ordenador en una unidad de fabricación que desarrolla automáticamente varias operaciones. Por ejemplo, una de estas unidades podría taladrar un bloque de metal, hacerlo girar sobre un torno, trabajar la pieza sobre éste hasta darle una forma determinada y finalmente acabarla con un baño. Un sistema jerárquico de ordenadores controla todas las máquinas que intervienen en el proceso, las cuales están conectadas a una cinta transportadora. Entre las candidatas más probables a la pronta introducción de sistemas flexibles de fabricación figuran las industrias de tuercas y tornillos para máquinas y de troqueles, de máquinas-herramienta para la metalurgia y de aviones.

Los bienes de capital representarían una proporción mayor del producto nacional total con la nueva tecnología que con la vieja. La producción de bienes destinados al uso de otras industrias sería casi un 9 por ciento más elevada con la nueva tecnología que con la vieja, y la inversión subiría en un 42 por ciento. La mayor producción de bienes de capital frenaría la presente transferencia de empleo de los sectores industriales a los sectores de servicios en los próximos 15 años.

A fin de comparar la productividad global de la economía con la vieja y con la nueva tecnología conviene describir con algún detalle las especificidades de una y otra para cada sector económico. La descripción concisa de cada tecnología podría asimilarse a una receta de cocina. Tal como se hace con los ingredientes de una de éstas, se detallan las cantidades de cada input de la receta industrial necesarias para rendir una unidad de producto. Se consideran inputs tanto el trabajo como los bienes y servicios suministrados por los diversos sectores de la economía.

Una receta industrial, al igual que las empleadas en la cocina, también debe especificar el número de cacerolas y sartenes, hornos, altos hornos, máquinas metalúrgicas, edificios industriales, etcétera, necesarios para procesar los inputs. En otras palabras, la receta debe enumerar los stocks de capital que precisa una industria, medidos, por ejemplo, en el número de unidades de cada tipo requeridas por cada unidad de producto industrial anual. El valor en dólares de estos stocks representa la inversión de capital anual por unidad de producto de la industria; los propietarios de los stocks de capital de cada industria procuran maximizar la tasa de



3. RELACIONES ENTRE LOS SALARIOS REALES y la tasa de rendimiento sobre el capital para la economía de los Estados Unidos con dos conjuntos distintos de condiciones tecnológicas. La línea negra indica la relación que puede lograrse con la combinación de recetas industriales empleada por los distintos sectores de la economía a finales de la década de 1970. Esta combinación, la que denominamos vieja tecnología, se refleja en una tabla input-output que describe los flujos de bienes y servicios entre 89 sectores de la economía. Esta permite calcular el precio unitario de cada output para cualquier nivel de salarios monetarios dado y para cualquier tasa de rendimiento sobre el capital, igual que en el caso de la economía de tres sectores que se describe en la figura 2. Un índice estándar del coste de la vida permite calcular a continuación el nivel de salarios reales que corresponde a los salarios monetarios y la tasa de rendimiento postulados. El salario real para el 12,5 por ciento de rendimiento sobre el capital que se pagó en 1979 se ha fijado en 1 dólar por hora. Obsérvese que un incremento de la tasa de rendimiento supondría una reducción de los salarios reales; un incremento de los salarios reales haría bajar la tasa de rendimiento. La línea de color refleja el resultado de los mismos cálculos para una segunda combinación de recetas industriales. Esta segunda combinación sintetiza la que denominamos nueva tecnología, esto es, las recetas económicas que podrían prevalecer al llegar el año 2000, como resultado de la introducción de la automación basada en el uso de ordenadores. La superposición de ambas líneas indica que la elección entre ambas tecnologías depende de la tasa corriente de rendimiento sobre el capital (o de los salarios reales corrientes). Por ejemplo, si la tasa de rendimiento bajo la vieja tecnología fuese del 11 por ciento (*a*), la introducción de la nueva tecnología permitiría su incremento hasta el 13 por ciento aproximadamente (*b*). Caso de considerarse suficiente una tasa de rendimiento del 11 por ciento, los salarios reales aumentarían de 1,03 dólares hasta casi 1,10 por hora bajo la nueva tecnología (*c*). Asimismo, tanto los propietarios como los asalariados podrían participar de las ventajas logradas con la nueva tecnología (*d*). Por otro lado, si la tasa de rendimiento se elevara al 21 por ciento bajo la vieja tecnología, los salarios reales serían de unos 78 centavos de dólar por hora (*e*) y los costes del cambio a la nueva tecnología determinarían una caída de los salarios reales (*f*), una reducción de la tasa de rendimiento (*g*) o ambas cosas a la vez (*h*). Si la tasa de rendimiento en el momento del cambio fuese de un 17,5 por ciento (*i*), la sustitución de la vieja tecnología por la nueva no tendría ningún incentivo ni valor disuasorio.

rendimiento de esta inversión. La tasa de rendimiento lograda con las distintas tecnologías, expresada en porcentaje de la inversión anual de capital, determina la elección de tecnología.

Una tabulación sistemática de las recetas industriales empleadas por todos los sectores en que se divide la economía nos ofrece una descripción concisa y detallada de la estructura tecnológica de la economía en un momento dado. Esta estructura determina los inputs que cada sector debe recibir de otros sectores y especifica qué parte del producto de cada sector debe suministrarse a cada uno de los restantes. Asimismo, la estructura industrial establece también el número de trabajadores a emplear por cada sector en cada tipo concreto de trabajo y el número de máquinas y otros bienes de capital de diversos tipos que ha de mantener cada sector.

A partir de esta información tecnológica puede establecerse un sistema de ecuaciones que permite calcular los precios de todos los inputs y outputs (productos) de la economía. Las ecuaciones indican que el precio de cualquier bien o servicio no sólo depende de los salarios de los trabajadores y de la tasa de rendimiento sobre el capital imperantes en la industria productora del bien o servicio en cuestión, sino también de los salarios y las tasas de rendimiento de todas las demás industrias.

Una vez determinados los precios para una combinación dada de salarios y rendimientos sobre el capital, puede ajustarse la medida de los salarios a las variaciones en el nivel medio de precios de los bienes de consumo. Se supone que cada consumidor compra anualmente una combinación dada de productos y se calcula el coste total de esta combinación para cada uno de los años que le interesa examinar al economista. La relación de este coste para un año dado con el coste de un año seleccionado como base comparativa constituye el índice del coste de la vida. Los salarios monetarios o la remuneración en dólares percibida cada año por la fuerza laboral pueden convertirse entonces en salarios reales o en los salarios efectivos bajo cualquier nueva combinación de salarios monetarios y tasa de rendimiento. Los salarios reales son iguales a los salarios monetarios divididos por el índice del coste de la vida.

Mientras no varíe la base tecnológica de una economía o, dicho de otro modo, mientras la receta industrial siga siendo la misma, se mantendrá una relación definida y biunívoca entre la tasa de rendimiento sobre el capital y el nivel de salarios reales. Con una tecnología fija, a cada tasa de rendimiento dada sobre el capital productivo invertido corresponde un único nivel de salarios reales. Lo que es lo mismo, a un nivel dado de salarios reales corresponde una sola tasa de rendimiento sobre el capital. A nadie extrañará, pues, que la relación entre tasa de rendimiento y salarios reales sea inversa: en el marco de cualquier tecnología dada, los intereses de los inversores y los asalariados son contrapuestos. Un incremento en la tasa de rendimiento del capital implica una reducción de los salarios reales, y viceversa: un aumento de los salarios reales implica una reducción de la tasa de rendimiento. La relación recíproca entre salarios reales y tasa de rendimiento para una tecnología determinada puede interpretarse como una medida de la productividad de la economía basada en dicha tecnología.

Puede describirse un cambio en la base tecnológica de la economía como la sustitución de viejas recetas industriales por otras nuevas en algunos o en todos los sectores de la misma. Este cambio ha de producir forzosamente

una variación en la relación biunívoca entre los salarios reales y la tasa de rendimiento sobre el capital. La nueva relación puede determinarse a partir de un nuevo sistema de ecuaciones basado en las nuevas recetas industriales cuya introducción se está considerando. Las ecuaciones pueden resolverse una vez más en términos de los precios de los bienes y servicios, con un nivel de salarios monetarios y una tasa de rendimiento sobre el capital dados. El índice del coste de la vida permitirá calcular luego el nivel de salarios reales que corresponderá a cada tasa de rendimiento.

La adopción de la nueva tecnología en algunos o en todos los sectores económicos podría determinar un incremento en la productividad global de la economía. Por ejemplo, podría hacer posible un aumento de la tasa de rendimiento sobre el capital sin la consiguiente reducción del nivel de salarios reales. Recíprocamente, también podría permitir un incremento de los tipos de salario sin que se redujera la tasa de rendimiento sobre el capital. Aunque los intereses de propietarios y asalariados son contrapuestos dentro de cualquier tecnología concreta, un cambio de tecnología podría favorecer a ambos.

Un sencillo ejemplo numérico permitirá explicar mejor en qué consiste el análisis input-output de los precios para una tecnología. Supongamos una economía simple integrada por sólo tres sectores: un sector agrícola, un sector industrial y un sector doméstico que consume todos los productos finales y aporta una fuerza de trabajo. El sector agrícola produce sólo cosechas, que se miden en kilos, y el sector industrial fabrica sólo telas, que se miden en metros.

El sector doméstico no compra y consume la totalidad del producto del sector agrícola. Parte del mismo, como la fibra de algodón por ejemplo, sirve de materia prima para la fabricación de tela en el sector industrial y otra parte, como la alfalfa, se mezcla nuevamente con la tierra a fin de renovar los aportes de nitrógeno del suelo. Asimismo, el sector doméstico tampoco recibe la totalidad del producto del sector industrial en forma de producto final. Una parte de la producción de tela del sector industrial es adquirida por el sector agrícola para la confección de sacos para los cereales y otra parte la emplea el propio sector industrial para la fabricación de ropas especiales de trabajo.

Para concretar, supongamos que la receta para la producción de un kilo de cosecha agrícola requiere el input de 0,25 kilos de cultivos, 0,14 metros de tela y 0,55 horas de trabajo. (Se supone que la lluvia, la tierra y la luz del sol son bienes gratuitos, o sea, no económicos.) La receta para la producción de un metro de tela requiere 0,4 kilos de cultivos, 0,12 metros de tela y 2,7 horas de trabajo. Estas cantidades se denominan coeficientes de input. Si el producto real del sector agrícola es de 100 kilos, bastará multiplicar por 100 los coeficientes de input para la agricultura y resultará que se precisan 25 kilos de cultivos, 14 metros de tela y 55 horas de trabajo. Para un producto real del sector industrial de 50 metros de tela se necesitarán 20 kilos de cultivos, seis metros de tela y 135 horas de trabajo.

Una tabla input-output presenta en cada columna de cifras los valores de los inputs corrientes que absorbe un sector económico. Puesto que cada input a la vez es también un producto (output), cada cifra de la columna tendrá también asignada una línea concreta de la tabla de la cual forma parte. En consecuencia, la columna "Agricultura" del ejemplo anterior incluirá las cantidades de 25 kilos, 14 metros y 55 horas de trabajo. La columna "Industria" incluirá las cantidades de 20 kilos, seis metros y 135 horas de trabajo.

Una vez anotadas las recetas de los inputs en las correspondientes columnas de la tabla, las líneas nos darán, de izquierda a derecha, la distribución del producto de cada sector económico entre todos los sectores, incluido el propio. Así, la tabla muestra que de los 100 kilos de cosecha producidos por el sector agrícola, 25 deben devolverse a este sector, otros 20 se venden al sector industrial y restan 55 para el consumo de las unidades domésticas. Del mismo modo, la segunda línea de la tabla muestra que de los 50 metros de tela producidos por el sector industrial, 14 irán a la agricultura, seis volverán a la industria y restarán 30 para el consumo doméstico [*véase la figura 1*].

Pero los inputs de materiales y trabajo no bastan para producir cosechas o tela. Cada sector de la pequeña economía posee también stocks de capital. En la agricultura, éstos comprenden graneros construidos con madera de las zonas de bosque reservadas por el sector agrícola y cobertizos para secar el grano que pueden cerrarse con tela, procedente del sector industrial, en caso de tormenta. Los stocks de capital de la industria comprenden edificios construidos con la madera del sector

agrícola y cintas transmisoras de energía fabricadas con tejido del sector industrial.

Ya he señalado que debe disponerse de una determinada cantidad de stocks de capital para que una industria pueda empezar a transformar sus inputs en producto. Supongamos que para cada kilo de cosecha se precisa un stock de capital de 0,5 kilos de cosecha y 0,3 metros de tela. Asimismo, para cada metro de tela se precisa un stock de capital de 2 kilos de cosecha y un metro de tela. Estas cantidades se denominan coeficientes de capital.

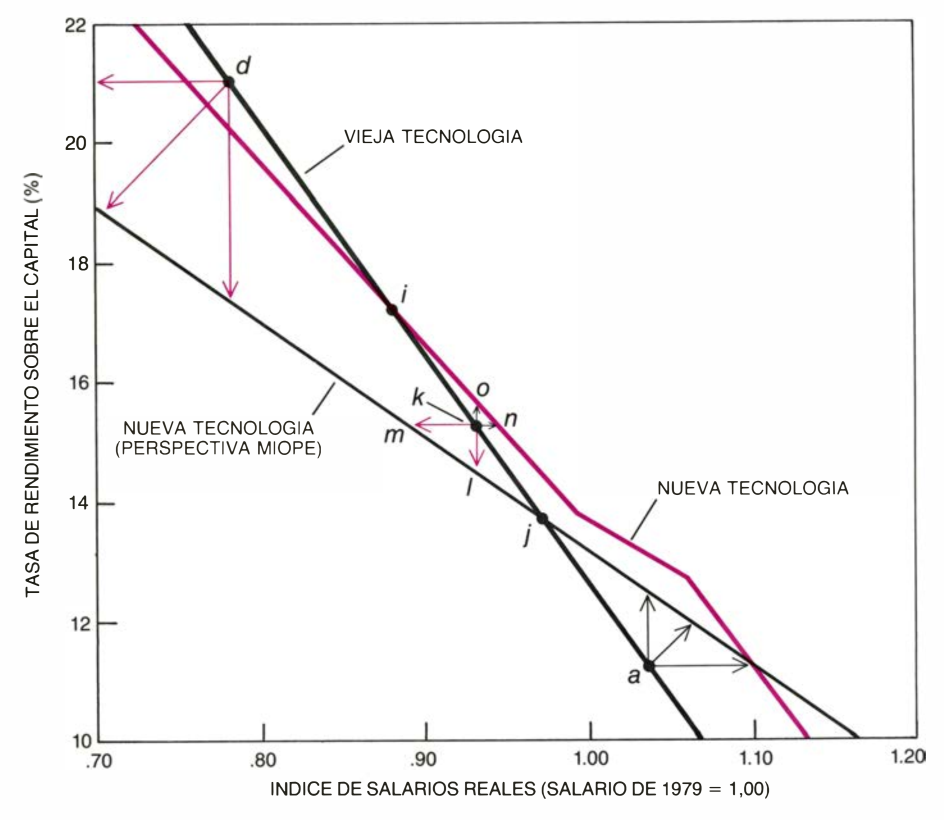
Ahora podemos calcular el precio unitario de cada producto de la economía con una tasa dada de rendimiento sobre el capital por unidad de producto de una industria. Cada precio unitario será igual al coste de los inputs materiales absorbidos, más el coste de los stocks de capital empleados por unidad de producto, más el coste de los inputs de trabajo por unidad de producto. Por ejemplo, el coste de los inputs de la agricultura por kilo de producción agrícola es igual a 0,25 multiplicado por el coste por kilo, más 0,14 multiplicado por el coste por metro de tela. Si la tasa anual de rendimiento sobre el capital es del 10 por ciento, el coste del capital necesario por kilo de producción agrícola es el 10 por ciento de 0,5 multiplicado por el coste por kilo, más el 10 por ciento de 0,3 multiplicado por el coste por metro de tela. El coste de la fuerza de trabajo es simplemente el producto del coeficiente del input trabajo, 0,55, multiplicado por un salario horario dado [*véase la figura 2*].

Obsérvese que una vez fijados el salario horario y la tasa anual de rendimiento sobre el capital, la fórmula o ecuación que permite obtener el precio de un kilo de cosecha sólo presenta dos incógnitas: el precio de un kilo de cosecha y el precio de un metro de tela. Puede construirse otra ecuación similar a partir de los coeficientes de input y los coeficientes de capital que determinan el precio de un metro de tela. En resumen, tendremos dos ecuaciones con las dos mismas incógnitas, ambas determinables, puesto que las ecuaciones se formulan independientemente una de otra. En este ejemplo se obtiene que, si el salario en ambos sectores de la economía simple es de 1 dólar por hora, un kilo de cosecha costará 2 dólares y un metro de tela 5 dólares.

En general, para una economía con *n* sectores que rinden un producto cada uno, tendremos que determinar *n* precios unitarios. Las recetas para los *n* productos de la economía darán lugar a *n* ecuaciones, cada una de las cuales incluirá como máximo *n* incógnitas. A partir de aquí podrá obtenerse, mediante métodos matemáticos directos, la solución para cada uno de los *n* precios unitarios. Con recetas industriales basadas en el modelo estándar de la tabla input-output, resultan cómodos y rápidos los cálculos mediante las técnicas del álgebra lineal y de los sistemas de matrices, fácilmente accesibles en programas de ordenador e incluso en algunas calculadoras de bolsillo.

Este procedimiento permite calcular los precios para cualquier combinación de nivel de salarios y tasa de rendimiento. Los salarios considerados en cada caso son los salarios monetarios y, para simplificar, se ha supuesto que siempre se paga un tipo de salarios fijo, en dólares constantes de 1979. A partir de este supuesto podremos calcular los precios de los bienes aplicando las ecuaciones a las distintas tasas de rendimiento. Puede demostrarse matemáticamente que el supuesto de unos salarios monetarios constantes no implica una pérdida de generalidad de nuestras conclusiones finales. En efecto, tanto las relaciones entre los precios de los distintos bienes como el nivel de salarios reales sólo dependen de los niveles relativos de los tipos de salarios monetarios y no de sus niveles absolutos.

Al objeto de determinar el conjunto de posibles combinaciones de valores de los salarios reales y de las tasas de rendimiento sobre el capital para la economía de los Estados Unidos con la vieja tecnología, dividimos ésta en 89 sectores de input-output. La descripción de la vieja tecnología se ha deducido a partir de los datos sobre coeficientes de input y de capital compilados por el Ministerio de Comercio para el año



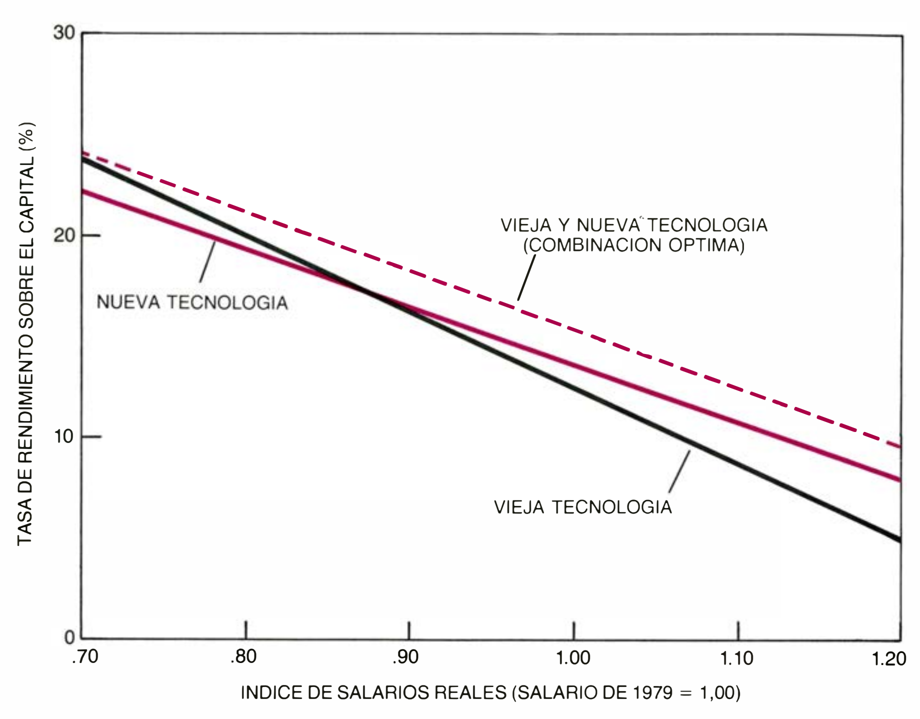
4. ANALISIS MIOPE DE LOS EFECTOS DE UNA NUEVA TECNOLOGIA; origina inexactitudes en la valoración de los costes y beneficios del cambio tecnológico. La línea negra fina refleja la relación entre los salarios reales y la tasa de rendimiento sobre el capital que cabría esperar si sólo un sector de la economía, concretamente la industria siderúrgica, adoptase la nueva tecnología basada en el uso de ordenadores. La línea negra gruesa y la línea de color reflejan las relaciones bajo la vieja y la nueva tecnología. Las curvas indican que el análisis miope determinaría la elección de la nueva tecnología si el clima económico dominante fuese el representado por el punto *a*, y recomendaría juiciosamente el empleo de la vieja tecnología si el clima económico fuese el representado por el punto *d*. Ahora bien, si la tasa de rendimiento fuese la correspondiente a cualquier punto *k* comprendido entre el 14 por ciento (*j*) y el 17,5 por ciento (*i*), el director de la fábrica rechazaría injustificadamente la nueva tecnología en razón de las pérdidas en la tasa de rendimiento (*l*) o en los salarios reales (*m*) anticipadas por el análisis miope. Un análisis más penetrante, que acompañara la introducción de la nueva tecnología en la industria siderúrgica de cambios similares en otros sectores de la economía, revelaría que la nueva tecnología podría beneficiar a los asalariados (*n*) o a los accionistas (*o*) incluso con estas altas tasas de rendimiento. Lamentablemente, la carencia de datos sobre el conjunto de la economía a menudo implica que los directores de empresa que consideran un cambio tecnológico sólo puedan aplicar rigurosamente el análisis miope.

1978. En 1979, el año que tomamos como base para el estudio, la tasa de rendimiento sobre el capital invertido giró en torno al 12,5 por ciento; los salarios reales correspondientes se han fijado en un dólar por hora. Si suponemos una tasa de rendimiento del 20 por ciento, los salarios reales bajarían a aproximadamente un 80 por ciento de su valor de 1979. Si suponemos, en cambio, una tasa de rendimiento de sólo un 5 por ciento, los salarios reales aumentarían en más de un 20 por ciento con respecto a su valor de 1979.

En consecuencia, cada solución del sistema de precios para los 89 sectores de la economía representa una relación distinta entre los salarios y la tasa de rendimiento del capital. La siguiente tarea consistía en examinar las repercusiones de estas relaciones sobre los precios relativos de los bienes. El precio relativo de un producto es igual a su precio monetario dividido por el índice del coste de la vida. Para los propósitos de nuestro análisis ajustamos los precios relativos de todos los bienes a la cantidad de un dólar para la relación entre salarios reales y tasas de rendimiento imperante en 1979.

Los resultados revelan que un aumento de la tasa de rendimiento, el cual lleva aparejada la correspondiente caída de los salarios reales, determina una subida de los precios relativos de los bienes producidos por sectores como la industria de servicios públicos, la extracción de minerales ferrosos y la industria ganadera. En la industria de servicios públicos, por ejemplo, un incremento de la tasa de rendimiento del capital hasta un 20 por ciento, a partir de su valor base del 12,5 por ciento alcanzado en 1979, determinaría un incremento del 25 por ciento en el coste de los servicios públicos. Sin embargo, el mismo incremento de la tasa de rendimiento tendería a rebajar los precios de los embalajes de madera y de los servicios de comercio al detalle. El precio de los embalajes de madera disminuiría, por ejemplo, hasta el 92 por ciento de su precio relativo en la economía de 1979.

La diferencia resulta de la proporción variable de valor añadido por el capital y el trabajo a los inputs materiales que integran el producto final. Industrias como los servicios públicos requieren cantidades relativamente importantes de capital. De ahí que los precios de estos productos sean bastante sensibles a un incremento de la tasa de rendimiento sobre el capital. En cambio, la fabricación de bienes tales como los embalajes de madera es relativamente intensiva en trabajo y, por tanto, la disminución de los salarios reales que acompaña al incremento en la tasa de rendimiento sobre el capital compensa con creces el aumento del coste de capital.



5. COMBINACION OPTIMA de vieja tecnología en algunos sectores de la economía y nueva en otros puede determinarse para cualquier tasa dada de rendimiento sobre el capital a partir de la solución de un problema de programación lineal. La relación entre tasa de rendimiento y salarios reales se superpone a las relaciones que prevalecerían si todos los sectores adoptasen sólo la vieja tecnología o sólo la nueva. La combinación óptima permite una mejora de los salarios reales y de la tasa de rendimiento.

A fin de comparar las relaciones recíprocas entre salarios y tasa de rendimiento bajo la nueva tecnología con las necesarias bajo la vieja, hubo que resolver otro sistema de 89 ecuaciones para los 89 precios de los productos de cada uno de los 89 sectores económicos. Las ecuaciones se construyeron exactamente igual que las establecidas para la vieja tecnología, introduciendo en cada una de ellas los coeficientes de input y de capital correspondientes a nuestro tercer conjunto de supuestos sobre la introducción de la automación basada en el uso de ordenadores. Un ordenador se encargó de resolver las ecuaciones para cada uno de los valores de la tasa de rendimiento postulados.

Podemos representar, en un gráfico, las relaciones recíprocas entre los salarios y la tasa de rendimiento bajo la vieja y la nueva tecnología. El eje horizontal simboliza los salarios reales y, el eje vertical, la tasa de rendimiento [*véase la figura 3*]. Con la nueva tecnología, la tasa de rendimiento del 12,5 por ciento, imperante en 1979, habría permitido a los trabajadores obtener unos salarios reales más de un seis por ciento superiores a los percibidos con la vieja tecnología. Si los trabajadores se hubieran contentado con los mismos salarios reales que recibieron ese año, la nueva tecnología habría permitido un rendimiento anual de casi el 14 por ciento. En consecuencia, partiendo de la relación entre salarios y tasa de rendimiento de 1979, tanto los trabajadores como los propietarios habrían salido ganando económicamente con la sustitución de la vieja tecnología por la nueva.

Bajo la nueva tecnología, los niveles de salarios para unas tasas de rendimiento dadas son superiores a los que resultarían bajo la vieja tecnología, siempre que la tasa de rendimiento no superase el 17,5 por ciento. A ese nivel, el tipo de salarios reales es igual al 88 por ciento de su valor base, tanto para la nueva tecnología como para la vieja. Si la tasa de rendimiento aumentara por encima del 17,5 por ciento, la adopción de la nueva tecnología no podría beneficiar ni a los trabajadores ni a los propietarios. En ese caso, los costes de las mejoras y la expansión del capital llegarían a anular las ventajas que pudiera reportar la nueva tecnología. Este análisis permite explicar, de paso, la razón por la cual los empresarios japoneses parecen a menudo más deseosos

de adoptar la nueva tecnología que sus colegas norteamericanos. El hecho de que muchas veces se contenten con una tasa de rendimiento inferior sobre el capital invertido, aumenta las probabilidades de que la rentabilidad de la inversión pueda mejorar con la introducción de la nueva tecnología.

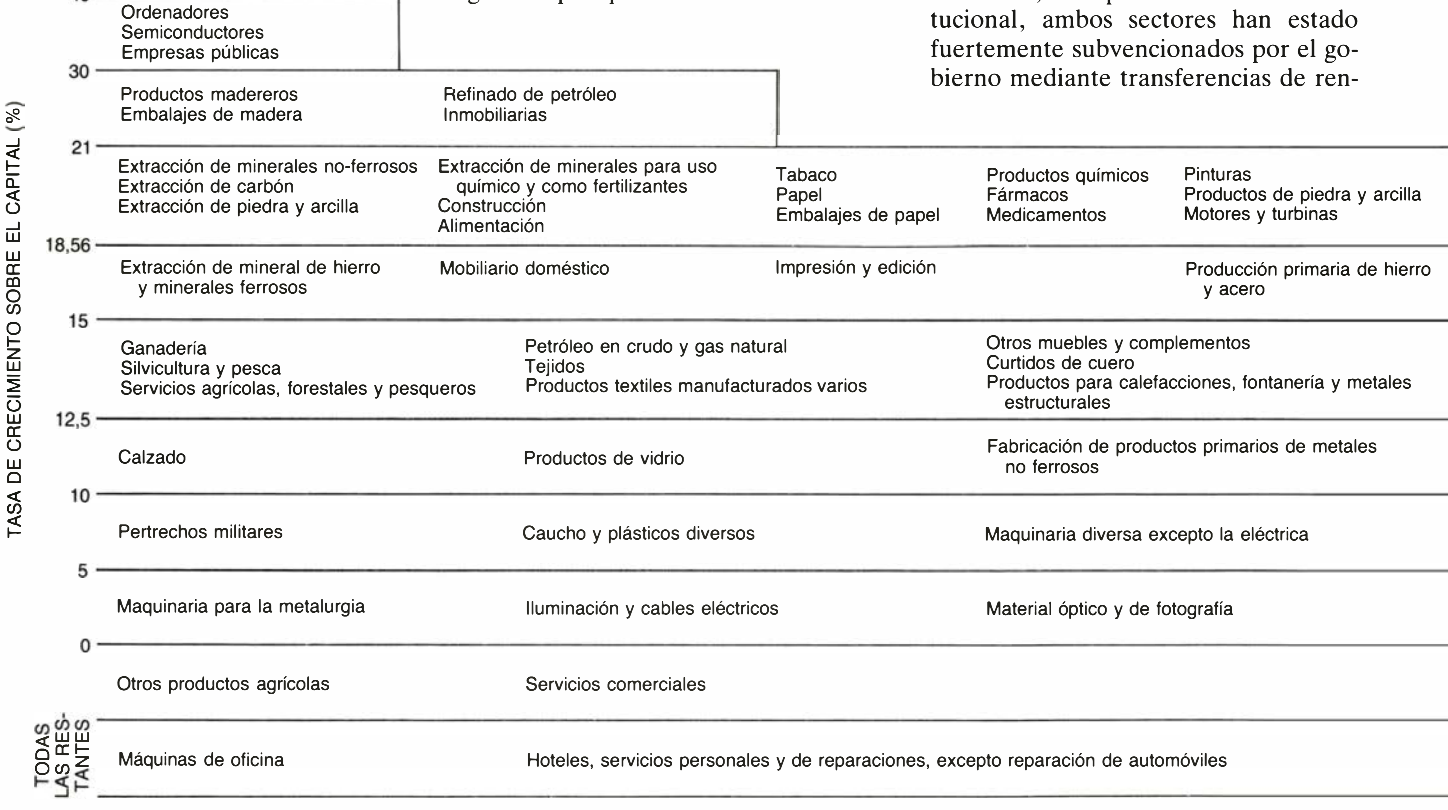
A partir de estas relaciones entre salarios, tasas de rendimiento y tecnologías, puede comenzar a esbozarse una explicación cuantitativa de lo que ocurre cuando no se introduce la nueva tecnología en algunas industrias. Imaginemos una vez más la situación con que se enfrenta el director de una acería. Dada la oferta de capital que refleja la tasa de rendimiento sobre el mismo, aquél debe decidir si le conviene o no modernizar la planta. Pero, como ya señalaba antes, las comparaciones de costes entre la vieja y la nueva tecnología en general no suelen realizarse en razón de la aplicación sistemática de un modelo empírico y detallado de la economía nacional. Al contrario, característicamente se basan sólo en los precios observados en la economía en el momento de tomar la decisión. Estos precios reflejan el predominio de la vieja tecnología no sólo en la siderurgia, sino también en todas las restantes industrias.

Este tipo de estudio de costes de una nueva tecnología requiere solamente la resolución de una sola ecuación, en la cual se refleja la nueva receta industrial para la producción de acero que se está considerando. Los precios de los inputs materiales y de los bienes de capital incluidos en la ecuación no son cantidades desconocidas, como sucede en el análisis input-output. Al contrario, se trata de meras constantes ya determinadas por la economía bajo la vieja tecnología. El nuevo precio de una unidad de acero producido determina entonces los salarios reales para una tasa dada de rendimiento sobre el capital, según la fórmula ya descrita.

Este método de determinación de los costes de una nueva tecnología tiene que resultar forzosamente sesgado, salvo en el caso, poco probable, de que, incluso después de la adopción de la nueva tecnología por la industria siderúrgica, todas las restantes industrias continúen aferradas a la vieja tecnología. Hemos calculado la relación entre salarios y tasas de rendimiento bajo este nuevo conjunto de costes y los hemos comparado, a continuación, con las relaciones existentes bajo la vieja tecnología. Constatamos que el director de la acería debe pronunciarse contra la introducción de la nueva tecnología siempre que la tasa de rendimiento sea superior al 14 por ciento. Luego, si se da el caso de que la tasa de rendimiento se sitúe entre el 14 y el 17,5 por ciento, el director habrá tomado una decisión perjudicial para su compañía [*véase la figura 4*]. En tal caso, el director decidiría no cambiar a la nueva tecnología, a pesar de que un análisis más completo y correcto revela que tanto los empleados como los propietarios de la fábrica saldrían ganando con el cambio.

Al examinar los resultados de nuestros cálculos, observamos que un incremento de la tasa de rendimiento sobre el capital y la correspondiente reducción de los salarios reales supondrían la disminución de los precios relativos de casi todos los bienes y servicios, con la excepción de los precios relativos de los hospitales, asistencia sanitaria y servicios educativos, que aumentarían en mayor medida que los de casi todos los restantes bienes. Esta constatación nos impulsó a estudiar qué ocurriría en caso de una introducción generalizada de la nueva tecnolgía, con la sola excepción de estos tres sectores.

Los resultados obtenidos revelan que la introducción de la nueva tecnología en el sector sanitario y en el educativo, más que promover, frena la capacidad de generación de renta. De hecho, en el presente contexto institucional, ambos sectores han estado fuertemente subvencionados por el gobierno mediante transferencias de ren-



6. INCENTIVO ECONÓMICO que ofrece la introducción de la automación basada en el uso de ordenadores. Dicho acicate depende de la tasa de rendimiento sobre el capital y de los salarios reales que corresponden a cada nivel de la misma. Se determinó la combinación de vieja y nueva tecnología que maximiza los salarios reales para cada una de las tasas de rendimiento. Cada cálculo permitió obtener una lista de sectores que optarían por la nueva tecnología. El cuadro presenta las distintas listas y muestra las relaciones entre las mismas. Por ejemplo, los tres sectores enumerados en el nivel superior debe-

tas percibidas de otros sectores. Una formulación teórica más afinada, que incluyera explícitamente los impuestos y subvenciones, seguramente permitiría reconstruir con mayor detalle las relaciones input-output implícitas.

Por el momento, bastará con señalar que tanto en la educación como en la asistencia sanitaria cabe esperar que la nueva tecnología mejore la calidad del producto final, con el consiguiente beneficio para los consumidores. En la medida en que las ventajas obtenidas procedan de bienes totalmente nuevos, no es posible incluirlas legítimamente en el índice del coste de la vida o en la medida de los salarios reales empleados en la presente formulación del modelo input-output. En el estado actual de nuestros conocimientos empíricos, la decisión de introducir la nueva tecnología en estos sectores debe ser esencialmente política. Como también debe considerarse política la decisión contraria, de regresión fiscal, en otras palabras.

En general, he presentado la elección de tecnología como una competición eliminatoria entre dos equipos: la vieja y la nueva tecnologías. Evidentemente, en la práctica ninguno de estos dos equipos constituye un conjunto indivisible. Cabe incorporar a la alineación o devolver al banquillo a los distintos jugadores, las tecnologías individuales en este caso. Sobre este dato, y asumiendo el riesgo de sobrecargar excesivamente una base empírica frágil, mis colegas y yo intentamos hallar respuesta a un último interrogante: ¿qué combinación de tecnologías, viejas en algunos sectores y nuevas en otros, determinaría los salarios reales más altos para unas tasas dadas de rendimiento sobre el capital?

El problema de selección de esta combinación óptima puede abordarse matemáticamente como un problema de programación lineal. El resultado es una lista de sectores económicos que se beneficiarían con la introducción de nueva tecnología para cualquier nivel posible de la tasa de rendimiento [*véase la figura 6*]. Esta lista resulta distinta para cada tasa de rendimiento y en cierto sentido es acumulativa: cada sector que óptimamente debería optar por la nueva tecnología con una tasa elevada de rendimiento sobre el capital, también debería escogerla con todas las tasas de rendimiento más bajas. Por ejemplo, si la tasa de rendimiento se situase entre el 30 y el 40 por ciento, sólo la industria de ordenadores, la industria de semiconductores y las empresas públicas deberían adoptar la nueva tecnología. Si la tasa de rendimiento se situase entre el 21 y el 30 por ciento, a estos tres sectores deberían sumarse los fabricantes de productos madereros y de embalajes de madera, la industria de refinado de petróleo y la industria inmobiliaria. A medida que va descendiendo la tasa de rendimiento, un número cada vez mayor de industrias debería optar por la nueva tecnología.

Reviste indudable interés especular sobre la combinación de vieja y nueva tecnologías, que se obtendría si cada industria aplicara el análisis miope que describía antes para el caso de la siderurgia. Las elecciones realizadas por cada industria serían muy distintas de las que deberían tomarse de acuerdo con la solución de la programación lineal. En cambio, los salarios reales que pueden obtenerse para unas tasas de rendimiento determinadas sólo son ligeramente inferiores a sus valores óptimos.

Existen muchas otras posibilidades de aplicación de nuestras observaciones y métodos. El análisis que aquí he esbozado valdría para modelos input-output mucho más amplios y complejos que los utilizados. Los costes deducidos a partir de nuestro modelo podrían también aplicarse al análisis de modelos input-output interregionales, como el gran modelo de la economía mundial de las Naciones Unidas que publiqué, en 1977, conjuntamente con Anne P. Cater y Peter A. Petri, de la Brandeis University. Sin embargo, no avanzaremos seriamente en uno u otro sentido si no se crea antes una nueva base de datos más amplia. "Dinero, dinero y más dinero" era y sigue siendo la receta para ganar una guerra; datos, datos y más datos es la receta para obtener una buena explicación del funcionamiento real del sistema económico.

Maquinaria para la construcción Equipo de manipulado de materiales Maquinaria para la industria de servicios	Otro equipo para el transporte Transporte y almacenaje Emisiones de radio y televisión	Comercio al mayor Finanzas Seguros	Productos textiles diversos Vestidos
Embalajes y recipientes de metal	Equipo industrial general	Componentes electrónicos	Manufacturas diversas
Productos de las máquinas de tornillos Otros productos de metal manufacturados Maquinaria agrícola y de jardín	Equipos industriales especiales Equipos industriales eléctricos Equipos para la radio, la televisión y las comunicaciones	Tubos de electrones Maquinaria eléctrica diversa Instrumentos científicos y de control	Comunicaciones, excepto radio y televisión
Electrodomésticos	Aviones y piezas	Comercio al detalle	
Vehículos de motor	Servicios de electricidad, agua, gas y saneamiento	Organizaciones sin afán de lucro	
Servicios de reparación de automóviles			
Locales de comida y bebida	Diversiones Hospitales	Servicios sanitarios excepto hospitales	Servicios educativos (privados)

rían adoptar la nueva tecnología para todas las tasas de rendimiento por debajo del 40 por ciento. Todos los restantes sectores deberían adoptar la nueva tecnología para tasas de rendimiento por encima del 30 por ciento. Si la tasa de rendimiento fuese del 30 por ciento o menos, también deberían pasarse a la nueva tecnología los sectores enumerados en el segundo nivel. Sectores como los servicios sanitarios y educativos continuarían operando con la vieja tecnología, si sus decisiones sobre el uso de tecnología se basasen sólo en consideraciones sobre los tipos de salarios y tasas de rendimiento sobre el capital.

Función inmunológica de la piel

El mayor órgano del cuerpo humano constituye algo más que una cubierta protectora pasiva. Es, también, un elemento activo del sistema inmune. Células especializadas de la piel interactúan en la respuesta a invasores extraños

Richard L. Edelson y Joseph M. Fink

La elegante simplicidad de la piel humana esconde una rica y compleja multiplicidad de funciones. Aunque su grosor es de sólo unos pocos milímetros, constituye el mayor órgano del cuerpo y alberga gran variedad de células, altamente especializadas, organizadas en intrincadas estructuras y subsistemas. Recientemente se ha descubierto una de las funciones más notables de la piel, como parte integrante y muy activa del sistema inmunológico.

En realidad, tal descubrimiento no debería sorprendernos. La piel constituye nuestro punto de contacto con el medio ambiente externo y resulta especialmente vulnerable en el caso del hombre, ya que su cubierta de pelos es escasa. Es razonable suponer, por tanto, que la humanidad no habría sobrevivido a las infecciones ocasionadas por las múltiples heridas de la piel si la cubierta externa del cuerpo no fuera capaz de movilizar una potente y compleja respuesta inmunológica.

Este tipo de características funcionales, no siempre evidentes, suelen salir a la luz cuando se estudian en detalle ciertas enfermedades. El papel que desempeña la piel en ciertas enfermedades que le afectan se puso de manifiesto cuando se profundizó en el estudio de los cánceres de los linfocitos, glóbulos blancos de la sangre que controlan las funciones del sistema inmunológico.

Hacia 1970, y gracias a investigación en ratones, se clasificaron los linfocitos en dos tipos principales, funcionalmente distintos: las células *B* (que maduran en la médula ósea) y las células *T* (que maduran en el timo). Los linfocitos *B* están implicados en la respuesta inmune humoral. Sintetizan anticuerpos que reaccionan contra antígenos específicos como, por ejemplo, las moléculas presentes en la superficie de los organismos infecciosos o las células malignas. Los linfocitos *T*, por su parte, participan en la respuesta inmune celular. Por ejemplo, destruyen células infectadas por virus, inician la respuesta celular a una invasión bacteriana y reaccionan contra un trasplante de tejido incompatible. Ciertos subgrupos de células *T* modulan la respuesta inmune. Las células *T* "auxiliadoras" (*helper*) estimulan el proceso de maduración de las células *B* en células excretoras de anticuerpos, así como la expansión de poblaciones específicas de células *T*. Las células *T* "supresoras" disminuyen la respuesta funcional de las células *B* y limitan el tamaño de las poblaciones de los linfocitos *T*.

En 1972 se confirmó esta misma clasificación para los linfocitos humanos, en células *T* o *B*, emprendiéndose a continuación la tarea de reclasificar las anomalías linfocíticas como proliferaciones específicas de uno u otro tipo celular. Dentro de estos cánceres se incluyen las leucemias, caracterizadas por el gran número de linfocitos anómalos presentes en el torrente sanguíneo, y los linfomas, en los que las células malignas se acumulan en nódulos linfáticos y órganos. El resultado de la reclasificación fue sorprendente. Aunque en la sangre normal hay unas tres veces más células *T* que *B*, la gran mayoría de las leucemias y linfomas son cánceres de linfocitos *B*.

Ello no obstante, Ira Green, Philip S. Schein, Charles H. Kirkpatrick, Ethan M. Shevach, Marvin A. Lutzner y uno de los autores (Edelson), en el Instituto Nacional de la Salud de los Estados Unidos, encontraron que un amplio grupo de leucemias y linfomas derivaban de cánceres de células *T*, concretamente aquellas enfermedades en las que la piel aparecía significativamente infiltrada por células malignas. La dicotomía resultaba sorprendente. Casi todas las alteraciones linfocíticas en las que se observaba una considerable infiltración de la piel tenían su origen en las células *T*; aquellas en las que la piel quedaba indemne procedían de las células *B*. En otras palabras, las células *T* malignas parecían dotadas de una especial afinidad por la piel.

Cabía deducir de ello que todos los trastornos malignos producidos por células *T* con afinidad por la piel debían ser diferentes representaciones de una misma enfermedad. Es más, la afinidad por la piel de las células *T* malignas probablemente reflejara una característica similar de las células *T* normales de las que procedían; en la piel debe residir normalmente una población importante de células *T*. De hecho, en la piel humana normal se han observado a menudo linfocitos "viajeros" dispersos, aunque hasta entonces no se había dado mayor importancia a su presencia. Lo que constatábamos parecía ser, por tanto, la expansión maligna de una interacción, normalmente inapreciable, entre la piel y ciertas células *T* que residen en ella.

En pacientes que presentaban las manifestaciones clínicas típicas de las enfermedades malignas causadas por células *T* con implicaciones en la piel encontramos otros tres denominadores comunes. En primer lugar, se observaba una evolución natural de los pacientes. Las primeras lesiones tendían a ser "epidermotrópicas", es decir, se caracterizaban por la emigración de las células malignas hacia la epidermis, la capa externa de la piel. Tales lesiones tempranas iban remplazándose progresivamente por lesiones "no epidermotrópicas", en las que quedaba libre la epidermis a la vez que las células malignas se acumulaban en zonas más profundas de la piel y en tejidos subcutáneos. A menudo, si sólo se observan lesiones epidermotrópicas, el único órgano afectado por la enfermedad es la piel. El desarrollo de lesiones no epidermotrópicas, por el contrario, se correlaciona con la diseminación de las células malignas hacia órganos internos y con un pronóstico bastante peor.

En otras palabras, lo que se había

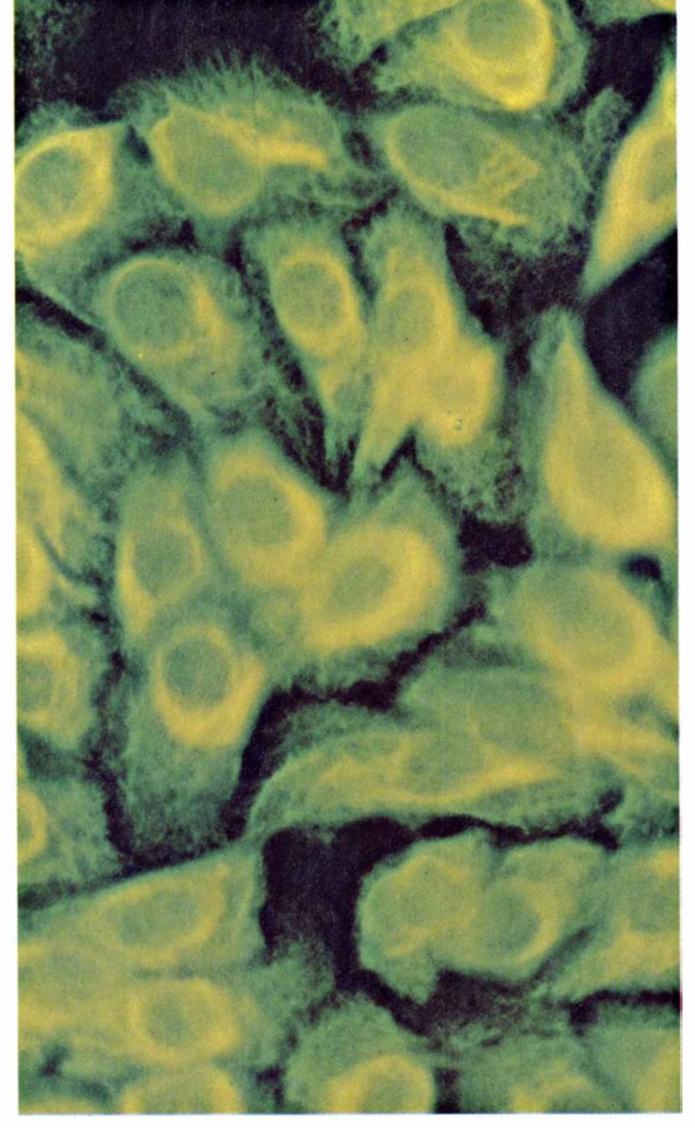
considerado diferentes tipos de cánceres de células *T*, que afectaban a la piel, eran, en realidad, manifestaciones clínicas de las diferentes fases de la evolución de un único tipo de enfermedad maligna. Dado que la característica biológica más notable de esas células *T* malignas era su afinidad inicial por la epidermis, denominamos a la enfermedad "linfoma cutáneo de células *T*" (*CTCL*). Reconocido su carácter de enfermedad única, se comprobó que la incidencia del *CTCL* era mayor que la de la enfermedad de Hodgkin, constituyendo el linfoma adulto más extendido.

Un segundo denominador común a los pacientes con *CTCL* era la primera manifestación clínica de la enfermedad: una erupción cutánea; y ello pese a que la célula maligna es un tipo de glóbulo blanco sanguíneo, y no una célula de procedencia epidérmica. Esta observación se apoya en los estudios de Henry Rappaport, de la Facultad de Medicina Pritzer, de la Universidad de Chicago, y de Louis B. Thomas, del Instituto Nacional del Cáncer, quienes examinaron muestras de autopsias de 45 pacientes con *CTCL*. En varios de ellos la enfermedad sólo había afectado a la piel y, aparentemente, no había desarrollo interno.

Finalmente, establecimos que el *CTCL* era una enfermedad producida por un tipo específico de células *T*, las auxiliadoras, observación que se realizó gracias a un sistema experimental desarrollado por Samuel Broder y Thomas A. Waldmann, del Instituto Nacional del Cáncer. Las células *B* normales purificadas no producen anticuerpos cuando se cultivan en el laboratorio, incluso en presencia de una lectina extraída de la hierba carmín (*pokeweed*), estimuladora de las células *B*. Sin embargo, al añadir células *T* normales o del tipo *CTCL* a esos cultivos, las células *B* elaboran grandes cantidades de anticuerpos. Ello demuestra que las células *T* malignas conservan a menudo las propiedades de las células *T* auxiliadoras normales.

Una extraordinaria historia se iba desentrañando poco a poco. El *CTCL* era una enfermedad maligna de células *T* auxiliadoras con especial afinidad por la epidermis. En 1974 llegamos a una importante conclusión: debe haber, normalmente, una población de células *T* que interaccione de forma dinámica con las células epidérmicas. El



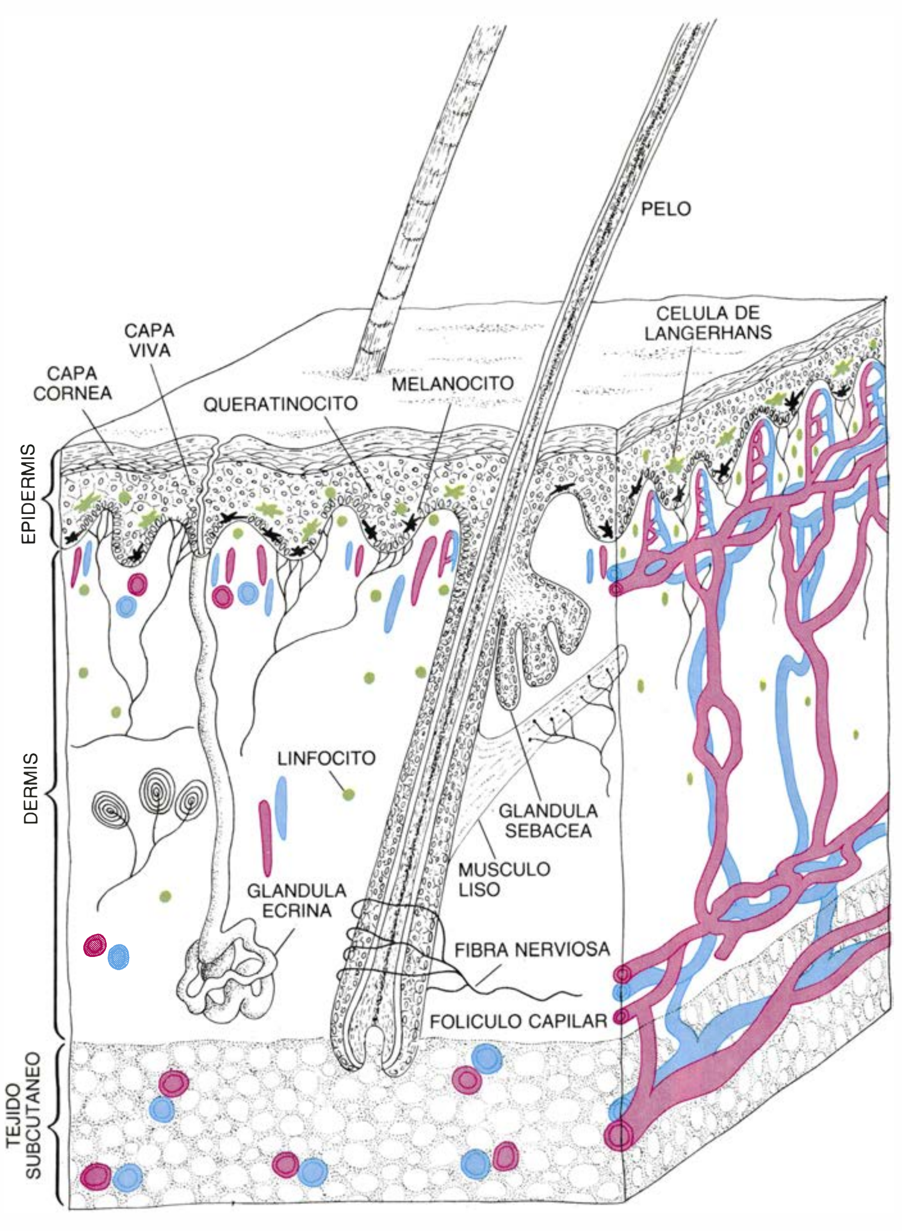


1. FUNCION INMUNOLOGICA DE LA PIEL. Se desprende de sus relaciones estructurales con el timo, órgano del sistema inmunológico donde maduran los linfocitos *T*. Las micrografías, realizadas por Tung Tien-Sun, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Nueva York, ponen de manifiesto una gran semejanza entre los queratinocitos, principales células de la epidermis (*izquierda*) y las células epiteliales del timo (*derecha*). Las células se incubaron con un anticuerpo contra la queratina, proteína sintetizada por los queratinocitos. El anticuerpo se tiñó, por una técnica de tinción indirecta, con fluoresceína, colorante fluorescente verde amarillento. Tanto en las células del timo como en las de la piel se observa una red de fibras de queratina.

CTCL sería un cáncer de esas células. Así las cosas, uno de los autores (Edelson) se planteó una posibilidad verdaderamente atractiva. ¿Podría constituir la piel un sitio donde, al igual que en el timo, madurasen ciertos tipos de células *T* ?

El timo, glándula situada en la parte superior del pecho, está formado por varios tipos de células. Las grandes e inmóviles células epiteliales pertenecen a una amplia categoría de células, entre las que se incluyen tipos tan diversos como las que revisten el tracto intestinal, bronquios y vasos sanguíneos, y las que actúan de células excretoras en muchas glándulas. Entremezcladas entre las epiteliales se encuentran las delgadas células dendríticas, caracterizadas por sus extensiones citoplasmáticas largas y delgadas.

Los linfocitos inmaduros que emigran desde la médula ósea hasta el timo se denominan timocitos mientras permanecen en dicha glándula. A medida que maduran en el timo hasta convertirse en células reconocibles posteriormente como linfocitos *T* conviven con los componentes celulares y toda una serie de hormonas de esa glándula. La maduración celular se produce de forma secuencial, a medida que se desplazan desde la parte externa de la glándula (córtex) hacia el interior (médula), antes de su traslado hacia otras partes del cuerpo. Según se sabía, incluso una vez terminada su fase de "educación" en el timo, muchas células *T* necesitaban un proceso posterior de maduración para alcanzar la funcionalidad total. No obstante, se desconocía dónde se producía esa obligada maduración postímica.



2. COMPLEJIDAD ANATOMICA DE LA PIEL. La superficie aparece recubierta por una capa córnea de queratinocitos muertos, repletos de queratina. Los queratinocitos vivos ocupan la epidermis y proliferan a medida que se pierden células muertas por la superficie. En la base de la epidermis se encuentran los melanocitos, que excretan los gránulos pigmentados responsables del color de la piel. Las células de Langerhans, células dendríticas encargadas de modificar los antígenos que llegan a la superficie de la piel, se ubican sobre la capa basal de queratinocitos. La dermis constituye un auténtico entramado de tejido conectivo bajo el que se encuentra el tejido subcutáneo graso. Los queratinocitos especializados de los folículos capilares fabrican pelos. La dermis es rica en fibras nerviosas y en vasos sanguíneos (*rojo y azul*). Los linfocitos *T* se encuentran, fundamentalmente, en la epidermis y la porción superior de la dermis.

Nuestro descubrimiento de que en la piel humana residía una gran población de células *T* venía a sugerir que la piel desempeñaba funciones análogas a las del timo. Observaciones experimentales pusieron claramente de manifiesto la existencia de una estrecha relación funcional entre timo y piel. Durante las dos últimas décadas, los biólogos han utilizado los llamados ratones "desnudos" para llevar a cabo manipulaciones inmunológicas. Estos ratones mutantes se denominan así por carecer de pelos en su epidermis. Resultan de gran interés para los inmunólogos, pues también carecen de timo, y son, por tanto, incapaces de desarrollar una población normal de células *T* funcionales, razón por la cual no rechazan los transplantes de tejidos. Además, cabe reconstituir parcialmente su sistema inmunológico mediante transfusiones de uno u otro tipo de células *T*. Ofrecen, por tanto, una amplia gama de posibilidades experimentales.

Los ratones desnudos se han sometido a cruzamientos con muchas otras estirpes de ratones. Los descendientes "congénicos" de estos cruzamientos llevan los genes responsables de la ausencia del timo, así como otros procedentes del otro ratón que interviene en el cruzamiento. A pesar de todas las reorganizaciones cromosómicas sufridas por los ratones desnudos en los últimos 20 años, resulta sumamente interesante el hecho de que nunca haya sido posible separar los genes responsables de la ausencia del timo de aquellos que determinan la ausencia de pelo en el cuerpo: o bien los genes que determinan el desarrollo del timo son idénticos a los responsables de la producción de pelo normal, o los dos conjuntos de genes están estrechamente ligados en el mismo cromosoma.

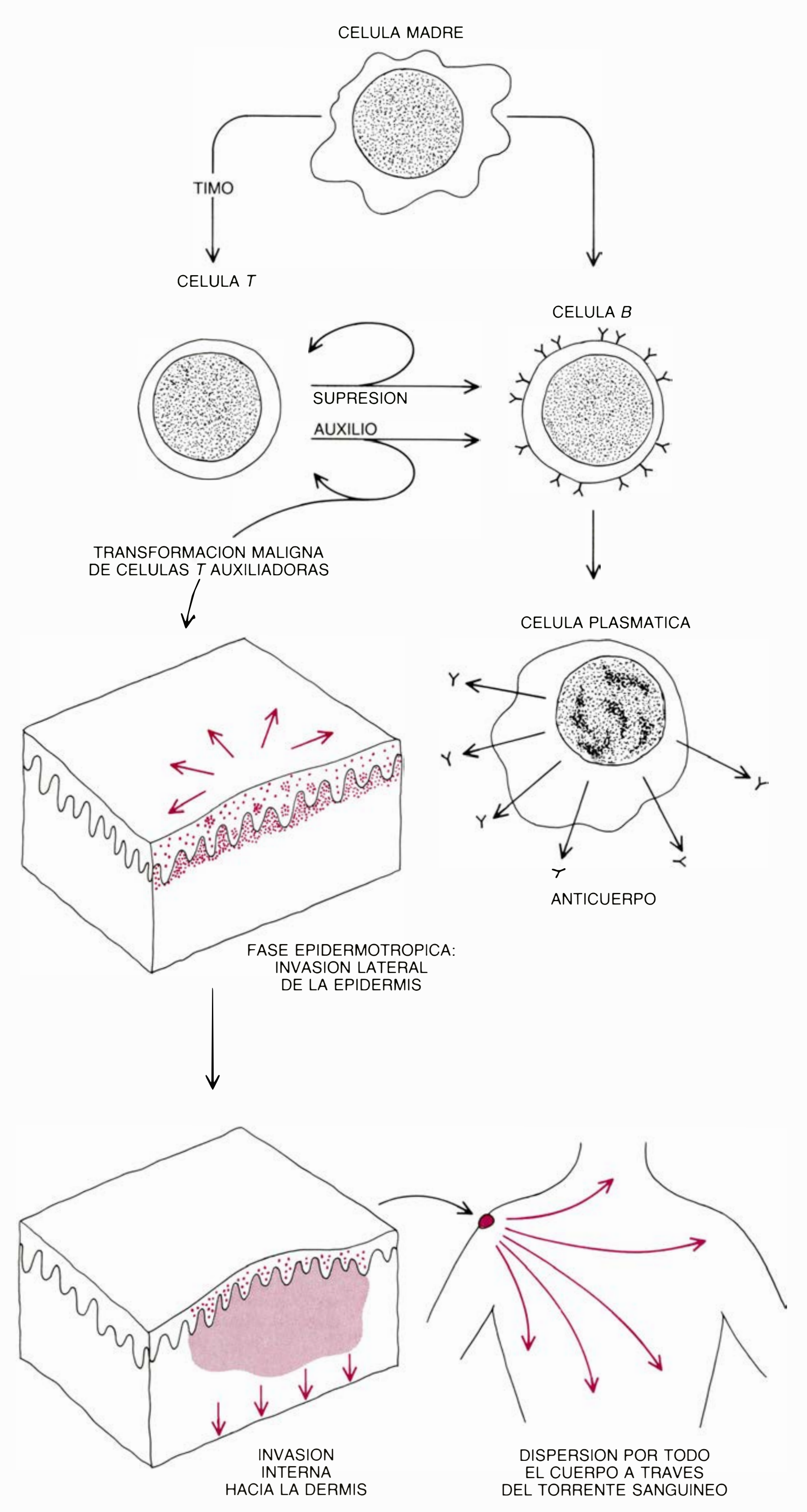
Otro indicio vino a apoyar la existencia de una estrecha relación entre piel y timo. Por medio de la microscopía electrónica se advirtió que algunas células epiteliales del timo poseían estructuras granulares características. Parecían idénticas a los gránulos "queratohialinos" distinguibles en los queratinoci-

tos, las principales células epidérmicas. Los queratinocitos sintetizan queratina, proteína estructural de la cubierta córnea externa de la piel y del cabello.

Se había comprobado, por tanto, la existencia de semejanzas genéticas y estructurales entre el timo y la epidermis de los mamíferos. Para elucidar si esas semejanzas se extendían también a los aspectos funcionales, Marian R. Rubenfeld, de nuestro laboratorio de la Facultad de Medicina y Cirugía de la Universidad de Columbia, y Allen E. Silverstone, del Instituto del Cáncer Memorial Sloan-Kettering, decidieron trabajar conjuntamente. En concreto, se trataba de comprobar si, en condiciones de cultivo en el laboratorio, las células epidérmicas ejercían alguna influencia sobre la maduración de las células *T*.

Los experimentos consistían en cultivar linfocitos inmaduros de hombres o ratón en presencia de queratinocitos epidérmicos y de un control celular adecuado. A continuación se comprobaba si se producía la maduración de las células *T*. En uno de los experimentos se cultivaron glóbulos blancos sanguíneos (de los que se había eliminado las células *T* maduras) junto con queratinocitos epidérmicos humanos, con células mamarias, con fibroblastos o con glóbulos blancos, o bien en un medio control. En otra serie de experimentos, se cultivaron células primarias de médula ósea de ratón (limpias, también, de células *T* maduras) junto con células epidérmicas o con fibroblastos de ratón de la misma estirpe, o bien en el correspondiente medio control. A continuación se recogían las células sanguíneas y las de médula ósea de los diferentes cultivos y se teñían con un anticuerpo fluorescente específico de una enzima denominada transferasa del desoxinucleotidilo (*TdT*).

Hasta entonces, la *TdT* se detectaba principalmente en los linfocitos durante cierta etapa del proceso de su maduración en el timo. Desaparece cuando la célula *T* madura, no detectándose su presencia en la sangre, bazo o nódulos linfáticos. Sin embargo, Rubenfeld y sus colegas encontraron que los linfocitos que se habían cultivado junto con los queratinocitos humanos producían la enzima *TdT*. En ninguno de los cultivos de control se detectó la enzima. Parecía, por tanto, que las células epidérmicas inducían a las células *T* no totalmente maduras (presumiblemente presentes en los cultivos de sangre o médula ósea, según el experimento de que se tratara) a que hiciesen algo que nor-

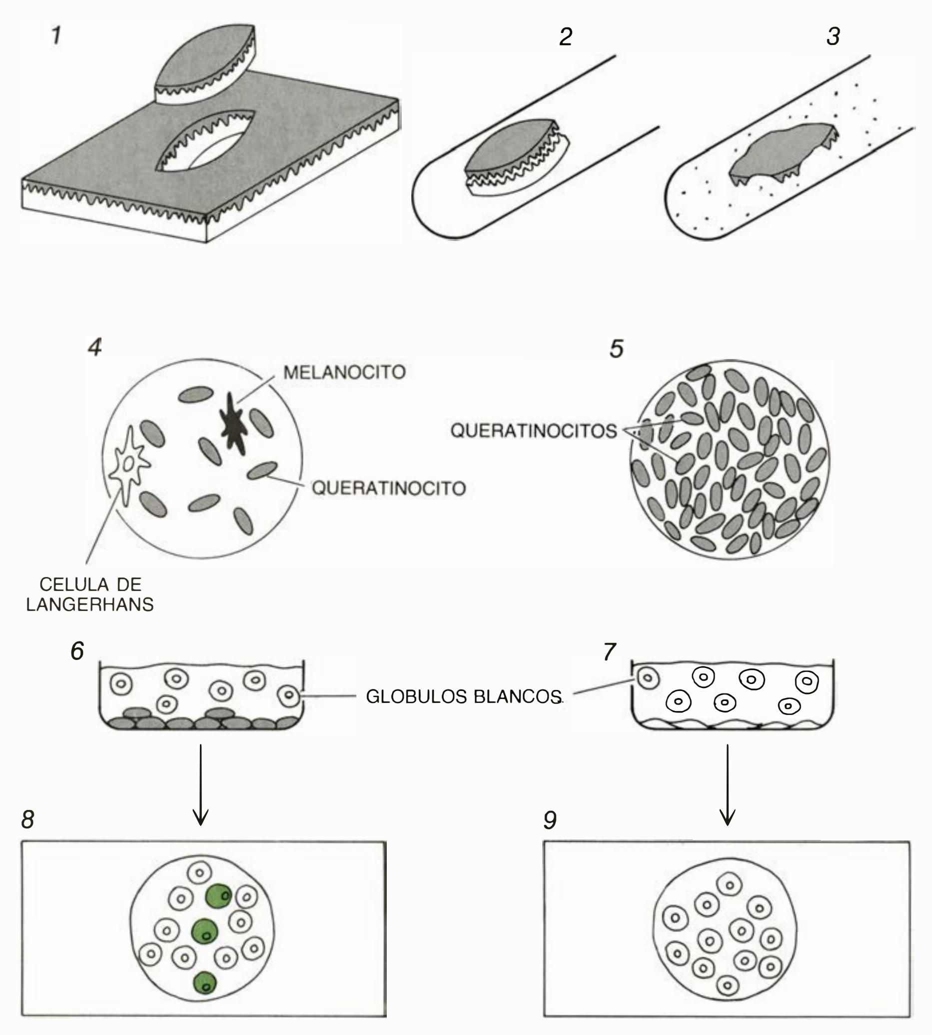


3. LINFOMA CUTANEO DE CELULAS *T* (*CTCL*), degeneración maligna de las células *T* auxiliadoras (*helper*). Tanto los linfocitos *T* como los *B* proceden de la médula ósea. Algunas células madre de la médula se diferencian en linfocitos *B*, que sintetizan anticuerpos específicos y los disponen en su superficie. La presencia de un antígeno específico determina que esos linfocitos *B* se transformen en células plasmáticas excretoras de anticuerpos. Otras células madre se diferencian bajo la influencia del timo, convirtiéndose en linfocitos *T* que, a su vez, pueden tener carácter "auxiliador" o "supresor", estimulando o inhibiendo, respectivamente, la función de las células *B* y de otras células *T*. Las células *T* auxiliadoras que se convierten en malignas muestran, a menudo, afinidad por la epidermis. A medida que surgen subclones de células *T* malignas, pierden su afinidad por la epidermis e invaden los órganos internos.

malmente sólo hacen en presencia del timo: sintetizar *TdT*. La enzima se encontró únicamente en los linfocitos que habían sintetizado nuevo ADN, como paso previo a la división celular. (La síntesis de nuevo ADN no constituía, por sí misma, la señal para fabricar *TdT*, pues se vio que otros estímulos de la división celular no producían igual resultado.)

Parecía indiscutible, por tanto, que los queratinocitos eran, en estos experimentos, las células responsables del impacto de la piel sobre la maduración de las células *T*, ya que eran las únicas células epidérmicas presentes en los cultivos. Sorprendía que esas células, cuyo papel, se pensaba entonces, era el de producir queratina, intervinieran de tal forma en la biología de las células *T*. Debe quedar claro, no obstante, que la piel no suplanta totalmente el papel del timo: los ratones a los que se les extirpa el timo inmediatamente después de nacer no llegan a desarrollar células *T* normales. Lo que sugieren los resultados de Rubenfeld es que los queratinocitos, en la piel, intervienen en las etapas postímicas de la maduración de las células *T*.

Casi al mismo tiempo, Bijan Safai y sus colegas, del Memorial Sloan-Kettering, encontraron que los pacientes de *CTCL* presentaban, en la sangre, altos niveles de un factor químico con propiedades similares a una hormona del timo, y que ese factor podía producirse en la piel procedente de la zona dañada. Tales observaciones de Safai tuvieron su continuidad en los trabajos de Anthony C. Chu y Carole L. Berger, de nuestro grupo, y Gideon Goldstein, de la compañía farmacéutica Ortho. Demostraron que un anticuerpo contra la timopoyetina, hormona tímica implicada en la maduración de las células *T*, era capaz de unirse a una molécula presente en el citoplasma de los queratinocitos de la capa basal de la epidermis humana normal. No era descabellado pensar que este factor queratinocítico, identificado por el anticuerpo, fuese una hormona activa responsable, al menos en parte, de los resultados de Rubenfeld. La confirmación de esa posibilidad exigirá el aislamiento y caracterización de la molécula reactiva y la demostración directa de su actividad biológica.



4. INFLUENCIA DE LA EPIDERMIS sobre las células *T*, según se desprende de experimentos con cultivos de tejidos. Se extrae una muestra de piel humana (*1*). Se separa la epidermis (*2*) y se incuba con la enzima tripsina (*3*) para disgregar sus células: queratinocitos, melanocitos y células de Langerhans (*4*). Tras cultivarlas dos semanas, los queratinocitos acaban colonizando toda la superficie, no detectándose ningún otro tipo de células epidérmicas (*5*). Los queratinocitos (*6*) y las células de control (*7*) se cultivan junto con glóbulos blancos humanos carentes de células *T* maduras. Se recogen los glóbulos blancos y se tratan con un anticuerpo contra la transferasa del desoxinucleotidilo terminal (*TdT*), una enzima que sólo se encuentra en las células *T* en período de maduración. El anticuerpo se une a algunos de los glóbulos blancos co-cultivados con los queratinocitos (*8*), pero no a los cultivados con las células de control (*9*). Cabe deducir de ello que los queratinocitos humanos pueden estimular la maduración de las células *T*.

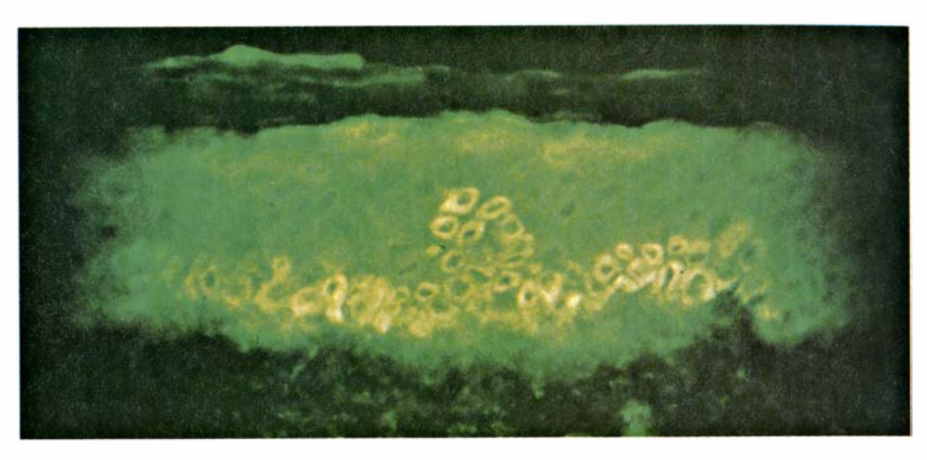
La pregunta obvia era si todas esas pruebas de laboratorio que apuntaban a una estrecha colaboración entre piel y timo constituían un reflejo de lo que realmente ocurría en los seres humanos vivos. Los trabajos de Barton F. Haynes, Brian V. Jegasothy y sus colegas, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Duke, iban en ese camino. Utilizaron un anticuerpo monoclonal, marcado fluorescentemente, específico de una molécula (*Thy*-1) que normalmente se encuentra en la membrana celular de los timocitos, pero no en la de las células *T* maduras que circulan por la sangre. Estudiaron células *T* malignas obtenidas de la piel dañada de pacientes con *CTCL*, así como de su sangre, y encontraron que sólo las células malignas de la piel presentaban *Thy-1* en su membrana externa. Parecía deducirse de ello que, una vez que las células malignas abandonan el torrente sanguíneo y se localizan en la piel, su membrana externa se altera, adquiriendo características similares a las de las células *T* que están madurando en el timo.

Tung Tien-Sun y sus colegas, del Hospital Clínico de la Universidad de Nueva York, trabajando con cultivos de células epiteliales procedentes de timo humano y de roedores, encontraron más pruebas de que el epitelio del timo es similar, estructuralmente, al componente epitelial de la piel. Aplicaron anticuerpos monoclonales fluorescentes específicos de queratina humana, la principal proteína producida por los queratinocitos en la epidermis, con lo que lograron identificar grandes cantidades de dicha proteína en el citoplasma de las células epiteliales del timo.

Haynes, Kay H. Singer y sus colaboradores compararon la superficie de las células epiteliales del timo con la de las células epidérmicas, utilizando para ello anticuerpos monoclonales fluorescentes. Encontraron, en la membrana externa de las células epiteliales del

timo, tres moléculas que excretan hormonas, las denominadas *TE*-4, *A*2*B*5 y *p*19. Curiosamente, encontraron las mismas moléculas en la superficie de los queratinocitos de la capa basal de la epidermis humana. Se trataba de las mismas células epidérmicas que, según demostramos, producían una sustancia muy parecida a la timopoyetina, la hormona del timo.

En resumen, entre las células epiteliales del timo y las de la piel, se advirtieron semejanzas anatómicas, moleculares y funcionales. La piel parecía constituir, por tanto, un componente del sistema inmunológico humano.



5. QUERATINOCITOS de la base de la epidermis humana. Contienen grandes cantidades de una molécula indistinguible de la timopoyetina, una hormona tímica que estimula la maduración de las células *T*. Para obtener esta micrografía se trató una sección de piel congelada con un anticuerpo contra la timopoyetina. Para detectar la presencia de este anticuerpo se utilizó un segundo, unido al colorante fluoresceína. El anticuerpo anti-timopoyetina aparece unido al citoplasma de los queratinocitos basales.



6. CELULAS DE LANGERHANS de la epidermis humana. Presentan una molécula, *T*6, que normalmente se encuentra en las células *T* que maduran en el timo. Se observa aquí cómo un anticuerpo contra *T*6, marcado indirectamente, se ha unido a tres células de Langerhans dispersas entre queratinocitos.

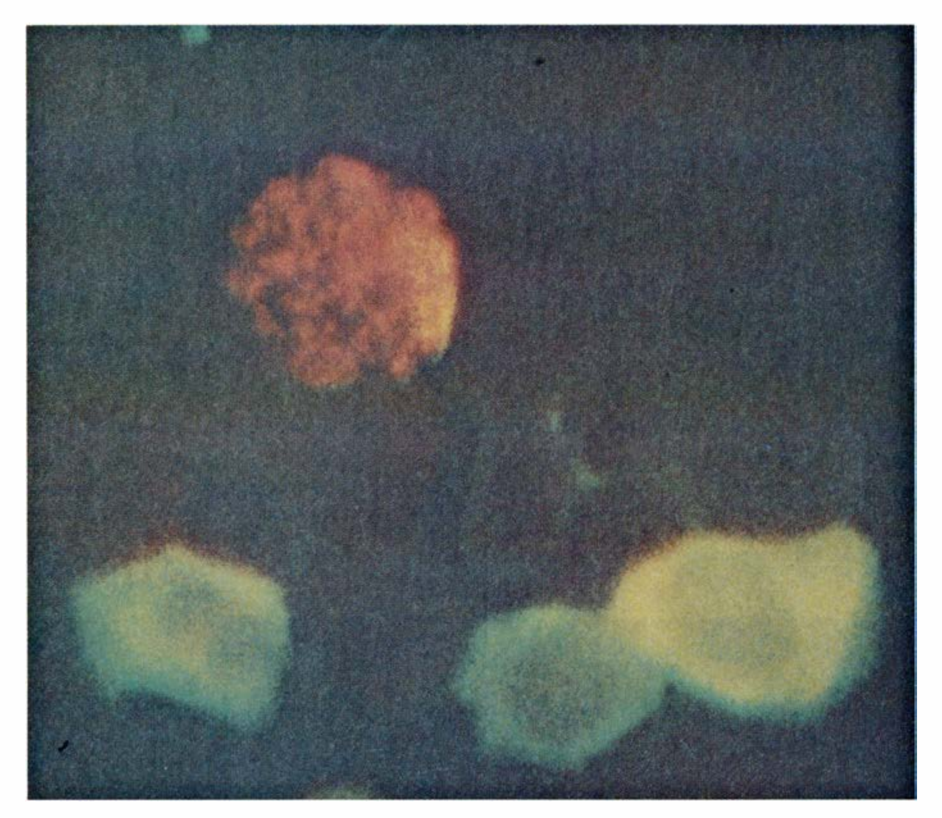
Los experimentos que hemos descrito se realizaron con cultivos celulares o con tejido humano intacto. Las investigaciones sobre las propiedades inmunológicas de la piel realizadas con animales de experimentación han aportado igualmente gran cantidad de información. Existen, no obstante, grandes diferencias entre la piel humana y la de roedores. La humana carece del espeso pelaje de los animales de laboratorio y resulta, por tanto, más susceptible a los daños que pueda ocasionarle el ambiente. Posee una epidermis más gruesa y estratificada y una gran cantidad de glándulas sudoríparas. Los animales no suelen desarrollar las mismas enfermedades de la piel que el hombre. No obstante, la posibilidad de manipular selectivamente el sistema inmune y la piel de estirpes consanguíneas de animales permite un nivel de experimentación muy por encima de lo aceptable en seres humanos, y mucho de lo que se aprenda con ellos resultará, sin duda, aplicable al hombre.

Paul R. Bergstresser, Robert E. Tigelaar, Craig A. Elmets y J. Wayne Streilein, del Hospital Clínico de la Universidad de Texas en Dallas, realizaron una laboriosa serie de experimentos con ratones, en los que trataban de estudiar la posibilidad de que células de la piel "presentaran" a los linfocitos *T* ciertos antígenos aplicados sobre ella. Al efecto inocularon pequeñas cantidades de un antígeno sobre la piel de un ratón, recogieron el segmento de piel afectado y lo trasplantaron a un ratón de la misma línea consanguínea y a otro de una línea distinta. Seguidamente se comprobaba si los ratones receptores quedaban inmunizados contra el antígeno. A las bajas concentraciones de antígeno utilizadas en los experimentos, sólo quedaban inmunizados los ratones pertenecientes a la misma línea. De lo que cabía deducir que el antígeno inoculado sobre la piel debía ser presentado a las células *T* por células ubicadas en la piel, y que éstas debían ser genéticamente idénticas a las células con capacidad de respuesta. La simple difusión hacia los nódulos linfáticos del antígeno no modificado carecía de capacidad inmunogénica. Este experimento demostraba que la modificación inicial del antígeno tenía lugar en la piel, y no en los nódulos linfáticos.

En otra serie de experimentos, los investigadores de Dallas comprobaron que cuando se inoculaba el antígeno dinitrofluorobenceno (*DNFB*) en la piel de un ratón previamente expuesto a radiación ultravioleta el animal no quedaba inmunizado contra el agente químico. Por el contrario, cuando el *DNFB* se aplicaba sobre piel no irradiada se comportaba como un excelente agente inmunizante. La aplicación de *DNFB* a piel irradiada con ultravioleta inducía realmente un estado de falta de reacción inmunológica, de carácter permanente y específica para el *DNFB*. Un ratón irradiado no podía posteriormente inmunizarse contra el *DNFB*, aunque sí contra antígenos no emparentados. La falta de reacción al *DNFB* podía transferirse a otro ratón si se efectuaba una transfusión de células *T* procedentes del ratón irradiado, señal de que el estado de no reactividad se debía a la acción de células *T* supresoras específicas.

Parece, por tanto, que la piel suele contener un tipo de células extremadamente eficaces, cuya función es presentar el antígeno a las células *T*, y que tal función puede eliminarse por la acción de la luz ultravioleta. Quedaba por descubrir la identidad de ese tipo celular. De los mismos resultados parecía desprenderse también que cuando las células "presentadoras" perdían su función, los antígenos las evitaban y estimulaban directamente la actividad de células *T* supresoras específicas, induciendo de ese modo una parálisis inmunológica específica.

Margaret L. Kripke y Warwick L.



7. CELULAS DE PIEL HUMANA EN SUSPENSION, teñidas diferencialmente. La célula de Langerhans presente reacciona con el anticuerpo específico de *T6*, que en este experimento se marcó indirectamente con rodamina, un colorante rojo. El citoplasma de los tres queratinocitos reacciona con el anticuerpo contra la molécula similar a la timopoyetina, en este caso marcado indirectamente con fluoresceína.

Morison, del Instituto Nacional del Cáncer, y Raymond A. Daynes, de la Facultad de Medicina de la Universidd de Utah, trataron ratones con dosis de ultravioleta superiores (mayores de las que llegan a producir quemaduras solares graves), y advirtieron la aparición de un estado de inmunosupresión general. Demostraron que ese estado se alcanzaba gracias a la estimulación de células *T* supresoras, y que iba unido a una disminución de la capacidad de las células del bazo para responder a los antígenos. En otras palabras, los daños producidos en la piel pueden tener importantes consecuencias en secciones del sistema inmune bastante distantes. Parece, por tanto, que algunas células inmunológicamente activas de la piel deben estar en comunicación con dichos sistemas celulares repartidos por el cuerpo.

Gracias a los trabajos de Georg Stingl y Klaus Wolff, de la Universidad de Viena, en colaboración con Shevach, Stephen I. Katz y Green, del Instituto Nacional de la Salud de los Estados Unidos, se reveló la identidad de las células inmunológicas de la piel. Sus experimentos se inspiraban en un importante, descubrimiento de Rudolph L. Baer e I. Silberberg-Sinakin, del Hospital Clínico de la Universidad de Nueva York; el hallazgo, no valorado entonces en su justa medida, estaba relacionado con las células de Langerhans, una pequeña población de células dendríticas de la epidermis, procedentes, ahora se sabe, de la médula ósea. El grupo de la Universidad de Nueva York pudo constatar, en el curso de una reacción alérgica de la piel, que algunas células de Langerhans se asociaban físicamente con linfocitos.

Stingl y sus colaboradores demostraron que las células de Langerhans poseen, en su membrana celular, receptores para ciertas moléculas, importantes desde el punto de vista inmunológico. Observaciones similares las efectuaron Geoffry Rowden y sus colaboradores, de la Facultad de Medicina de la Universidad McGill, y Lars Klareskog y sus colaboradores, de la Universidad de Uppsala. El grupo dè Stingl, enriqueciendo la concentración de células de Langerhans en suspensiones de células epidérmicas de cobayos hasta un 33 por ciento, aproximadamente (los restantes dos tercios eran queratinocitos), demostró que sólo aquellas suspensiones celulares que contenían células de Langerhans eran capaces de presentar el antígeno a las células *T*. No cabía duda de que las células de Langerhans eran las responsables de la capacidad inmunizante del antígeno aplicado de forma tópica, propiedad que quedaba suprimida con cantidades suficientes de energía ultravioleta.

Wlodzimierz Ptak, de la Facultad de Medicina Copérnico, de Cracovia, junto con sus colegas de la Facultad de Medicina de la Universidad de Yale, encontró una respuesta a la aparente paradoja que resultaba de los experimentos del grupo de Dallas, esto es, ¿cómo puede cierto antígeno, aplicado sobre la piel, inducir una respuesta auxiliadora (positiva) de las células *T* e inducir, además, una respuesta supresora (negativa) en ausencia de células de Langerhans funcionales? Demostraron que las células de Langerhans presentaban el antígeno utilizando una vía que activa, preferentemente, un circuito de células *T* auxiliadoras. Otras células implicadas en la maduración del antígeno, bajo ciertas condiciones, tienden a presentar al antígeno utilizando una vía que activa, preferentemente, un circuito supresor.

¿Actúan solas las células de Langerhans, o desempeñan algún papel los queratinocitos? Después de todo, los experimentos ya mencionados demuestran que los queratinocitos humanos y de ratón, en cultivo, son capaces, en ausencia de células de Langerhans, de inducir la presencia de *TdT*, un marcador específico de las células *T*, y que contienen, además, una molécula similar a la hormona tímica timopoyetina. Gerald G. Krueger y Daynes comprobaron que los queratinocitos de ratón, convenientemente inducidos, expresaban en su membrana una molécula, denominada *Ia*. Otros investigadores han comprobado que en los queratinocitos humanos, presentes en las lesiones de piel del tipo *CTCL* y otras, también se expresa dicha molécula. En un principio se pensó que esas moléculas sólo se encontraban en las células de Langerhans, donde se conocía su importancia dentro del proceso que tiene como objetivo presentar el antígeno a las células *T*. El grupo de Utah demostró que, inducidos a expresar *Ia*, los queratinocitos de ratón estimulaban a las células de Langerhans en su labor de presentar el antígeno a las células *T*.

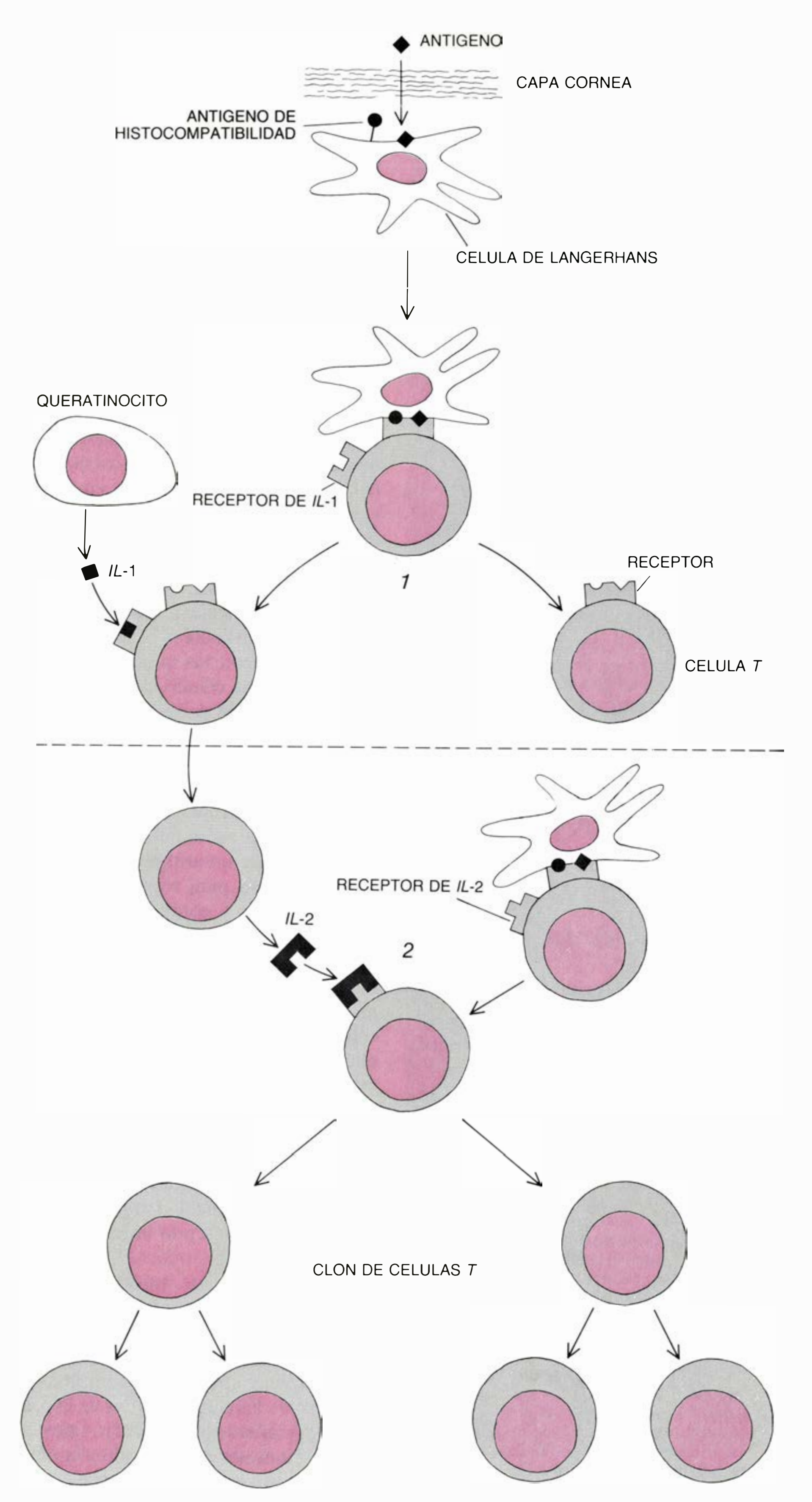
Thomas A. Luger, Daniel N. Sauder, Joost J. Oppenheim y Katz, del Instituto Nacional de la Salud, realizaron una observación que iba a ayudar a clarificar el panorama. Pretendían demostrar que las células de Langerhans sintetizaban interleuquina-1 (*IL*-1), un factor excretado por otras células tam-

bién encargadas de presentar antígenos, los macrófagos. El factor *IL*-1 resulta de capital importancia en la iniciación del proceso de inmunidad mediado por células *T*. Se une a receptores presentes en la superficie de las células *T* programadas para reaccionar contra un determinado antígeno. De ese modo, las células *T* se estimulan a liberar interleuquina-2, factor que, a su vez, induce la proliferación de la población de células *T* que deben dar cuenta de cada reto inmunológico específico.

Los investigadores del Instituto Nacional de la Salud encontraron, como así esperaban, que los cultivos de células epidérmicas de ratón (que contenían células de Langerhans) producían el factor *IL*-1. Para demostrar que ese factor lo elaboraban específicamente las células de Langerhans, las eliminaron de los cultivos de células epidérmicas de ratón. No sin sorpresa, comprobaron que los cultivos que carecían de células de Langerhans producían igual cantidad de *IL*-1 que los que sí las tenían. Cabía deducir que el factor *IL*-1 lo excretaban los queratinocitos. El grupo de Luger demostró a continuación que los queratinocitos humanos normales también excretaban *IL*-1.

Estos resultados completaban nuestros estudios anteriores, así como los del grupo de Duke. Los queratinocitos, células que vienen a ser la "mayoría silenciosa" de la epidermis, desempeñan un papel importante en el proceso inmunológico. Además de generar la capa externa protectora de queratina, producen sustancias parecidas a las hormonas, capaces de afectar profundamente a los linfocitos *T* que atraviesan la piel. Su impacto potencial sobre esas células *T* es amplio: desde influir en su maduración hasta estimular su respuesta inmunológica específica frente a los antígenos.

Recientemente se ha identificado otro tipo de célula epidérmica inmunológicamente activa. Richard D. Granstein, Adam Lowy y Mark I. Greene, de la Facultad de Medicina de Harvard, trataron suspensiones de células epidérmicas de ratón con radiaciones ultravioleta. Con ello conseguían eliminar las células de Langerhans funcionales. En los cultivos así tratados detectaron otro tipo de célula dendrítica con capacidad para presentar antígenos. Las células de Granstein, como se las conoce, son más resistentes a las radiaciones ultravioleta que las de Langerhans, y muestran tendencia a interactuar con las células *T* supresoras en vez de con las auxiliadoras.



8. RESPUESTA COORDINADA de las células de la piel inmunológicamente competentes. Comienza cuando un antígeno extraño penetra en la capa córnea de queratina. Se topa con las células de Langerhans, que lo transportan, junto con un antígeno de histocompatibilidad, hasta las células *T* (*1*) programadas para responder frente a dicho antígeno. Las células *T*, ya activadas, presentan un receptor para la interleuquina-1 (*IL*-1). La unión de este factor, excretado por los queratinocitos (y quizá por las células de Langerhans), induce a la célula *T* activada a excretar interleuquina-2. *IL*-2 se une a un receptor presente en otras células *T* sensibles al antígeno, localizadas en la dermis, nódulos linfáticos o en el bazo (*2*), induciendo su proliferación hasta formar una población de células *T* específicas contra el antígeno.

Empiezan ya a conocerse, por tanto, los componentes celulares y moleculares que intervienen en la respuesta a los antígenos por parte del subsistema inmunológico de la piel. A partir de toda la información acumulada hasta la fecha cabe elaborar un esquema general del proceso. El antígeno se une a cualquiera de los tipos de células dendríticas de la epidermis cuya misión es presentar antígenos: las células de Langerhans o las de Granstein. Las de Langerhans presentan el antígeno a células *T* auxiliadoras específicas, que muestran tendencia a emigrar hacia la epidermis, infiltrándose a través de los tejidos. Las células de Granstein, de la misma manera, pueden interactuar con células *T* supresoras. El equilibrio entre ambos tipos de respuesta (auxiliadora o supresora) es acusado, aunque el resultado neto suele ser una señal auxiliadora, o positiva, que acostumbra a constituir la respuesta correcta de la piel a los invasores potencialmente perjudiciales con los que a menudo se enfrenta. Si las células de Langerhans han sufrido algún daño (por energía ultravioleta, por ejemplo) o se eluden (así lo hacen ciertos antígenos que interactúan con el circuito supresor), puede predominar la señal supresora.

Además del estímulo que constituye la presencia de un antígeno, una célula *T*, programada para responderle, recibe un segundo y complementario tipo de señal: la molécula *IL*-1 excretada por los queratinocitos. Este estímulo hace que las células *T* excreten a su vez el factor *IL*-2, que interactúa con otras células *T* del mismo tipo, instando con ello un espectacular incremento del número de células *T* capaces de responder a la provocación antigénica. Estas células *T* entran en el sistema linfático y se esparcen por todo el cuerpo. Streilein ha agrupado los diversos componentes epidérmicos del sistema inmune bajo el nombre de SALT (tejido linfoide asociado con la piel).

Este elaborado mecanismo que tiene por misión provocar una respuesta cutánea de células *T* frente a la presencia de un antígeno, constituye probablemente sólo una parte de la compleja relación entre las células *T* y las de la piel. Resulta evidente que ciertos tipos de células *T* muestran una tendencia natural a localizarse en la piel y que la epidermis genera una hormona (o más de una) similar a las hormonas del timo, capaz de influir en la maduración de las células *T* cutáneas. Investigadores de todo el mundo, experimentando con animales, intentan descifrar la dinámica de las relaciones entre la epidermis y las células *T*. Algunas observaciones realizadas en nuestro laboratorio quizá ofrezcan una vía que permita extrapolar a los seres humanos estos estudios.

Pretendíamos detectar la presencia de la molécula *T*6 en piel humana intacta. Tal molécula se encuentra en la superficie de las células *T* que están madurando en el córtex del timo. Cuando las células *T* abandonan el timo, desaparece *T*6. Nuestra hipótesis era que las células *T* malignas debían volver a expresar las moléculas *T*6, con lo que cabría emplearlas de marcador y se facilitaría el diagnóstico temprano del *CTCL*. Ellen Fithian utilizó un anticuerpo monoclonal contra *T*6 con la intención de demostrar que las células epidérmicas humanas normales no poseían dicha molécula. Sorprendentemente, encontró que el anticuerpo reaccionaba con células epidérmicas normales que carecían de las demás propiedades de las células *T*. La forma dendrítica y el tipo de distribución de estas células que respondían al anticuerpo sugería que se trataba, en realidad, de células de Langerhans. La sospecha se confirmó tras comprobar que, además, poseían en sus membranas las moléculas *Ia*, característica de las células de Langerhans normales. Shinichero Takezaki y Sherie L. Morrison, de nuestro grupo, demostraron que la molécula *T*6 presente en las células de Langerhans era químicamente indistinguible de las encontradas en timocitos.

La presencia de *T*6 en las células de Langerhans (detectada también casi simultáneamente por George F. Murphy y sus colegas, de Harvard) ofrece un excelente marcador para identificar rápidamente ese tipo de células. Además, plantea algunos interrogantes interesantes. ¿Por qué expresan las células de Langerhans humanas normales un marcador de membrana característico de las células *T* inmaduras? Las células de Langerhans emigran hacia la piel desde la médula ósea, a través del torrente sanguíneo, y la sangre de adultos normales no contiene un número significativo de células con moléculas *T*6. ¿Acaso inducen algunas células epidérmicas la síntesis de esas moléculas por parte de las células de Langerhans o, por el contrario, las sintetizan las células *T* bajo la influencia de la piel y, una vez excretadas, se adhieren a la superficie de las células de Langerhans? ¿Desempeña *T*6 (cuya concentración en la superficie de la célula de Langerhans es muy alta) alguna función relacionada con las modificaciones antigénicas en el nivel celular? Con toda probabilidad, las modernas técnicas permitirán dar con las respuestas.

ACTH y su familia de péptidos

La hormona adrenocorticotrófica, ACTH, se sintetiza bajo la forma de una molécula de naturaleza proteica en la hipófisis. Molécula de la que se originan péptidos con distintas actividades biológicas

Fernando Estivariz

Desde el siglo pasado se conocen algunas funciones de las glándulas suprarrenales, gracias a los trabajos de Claude Bernard, famoso fisiólogo francés, y del médico inglés Thomas Addison. Este último estableció el cuadro clínico que producía la insuficiencia suprarrenal (adrenal), llamado en su honor, posteriormente, el "mal de Addison". Pero hasta los años 20 de nuestro siglo no se descubriría la dependencia funcional de un sector de estas glándulas, la corteza, con respecto a otra glándula: la hipófisis. Y hubo que esperar hasta la década de los 40 para asistir a otro gran avance: identificación del agente químico, de origen hipofisario, que media esa dependencia funcional; ese progreso lo instó el advenimiento de nuevas técnicas bioquímicas de purificación y análisis. Ese agente químico era la corticotrofina, llamada también hormona adrenocorticotrófica (ACTH).

Esa hormona es un péptido constituido por 39 aminoácidos. La ACTH, una de las siete hormonas principales que se producen en la hipófisis, controla principalmente un sector histológico específico de los tres de que consta la corteza suprarrenal. Los otros dos están controlados, en parte, como veremos más adelante, por péptidos de la familia de ACTH. La ACTH regula el ritmo de secreción de los glucocorticoides suprarrenales, que, junto con los mineralocorticoides y las hormonas esteroides sexuales, constituyen las tres clases de hormonas que se producen en las glándulas suprarrenales. (Los sufijos corticoides denuncian su pertenencia a la corteza.)

Entre los glucocorticoides se cuentan el cortisol, la cortisona y la corticosterona; su principal efecto metabólico es el de favorecer la síntesis de glúcidos, de glucosa en particular, a expensas de lípidos y proteínas, además de los consabidos efectos antiinflamatorios. Con respecto al control fisiológico de los niveles sanguíneos de glucocorticoides, cabe anotar que éstos se incrementan significativamente en las situaciones de emergencia, alarma o estrés, en las que el organismo debe contar con una gran disponibilidad de sustancias que provean rápidamente la energía necesaria para afrontar su defensa, como lo son los azúcares. En estas circunstancias, la ACTH se segrega con profusión hacia la circulación desde las células de la hipófisis que la producen, para que estimule a la corteza adrenal.

Antes de describir la forma en que se biosintetiza la ACTH, debemos aclarar algunos detalles anatómicos e histológicos de la hipófisis de los mamíferos. Esta glándula endocrina se encuentra en la base del encéfalo. Pende, por medio del tallo hipofisario, de una estructura del cerebro denominada hipotálamo, que es precisamente la región del sistema nervioso que regula el funcionamiento de la glándula. La hipófisis consta de tres partes: anterior o "pars distalis", intermedia o "pars intermedia" y nerviosa o "pars nervosa". Mientras que las dos primeras están constituidas por células epiteliales glandulares, la pars nervosa es una proyección de tejido nervioso proveniente del hipotálamo que contiene terminales nerviosos y tejido de sostén.

La pars distalis de la hipófisis la integran cinco tipos de células, por lo menos, distribuidas alrededor de abundantes capilares sanguíneos; cada tipo celular produce y segrega una hormona o clase de hormona determinada. Las células que originan la ACTH se denominan "células corticotróficas". En lo referente a la pars intermedia, ésta se halla en casi todos los mamíferos y está bien desarrollada en el feto humano, pero se atrofia y desaparece luego del nacimiento. Constituida principalmente por un solo tipo celular, hasta hace poco se le atribuía la producción de una sola clase de hormonas, las "melanotrofinas", que en los vertebrados inferiores y algunos mamíferos actúan promoviendo la producción y dispersión de melanina de las células pigmentarias de la piel, provocando el oscurecimiento o pigmentación de la misma; por cuya razón las células de la pars intermedia reciben el apelativo de "melanotróficas". La pars nervosa es la encargada de segregar dos tipos de hormonas (oxitocina y vasopresina), sintetizadas en cuerpos de células nerviosas del hipotálamo y transportadas a lo largo de sus axones hasta las terminaciones de esas neuronas en la pars nervosa, desde donde son liberadas a la sangre.

El hipotálamo regula la actividad secretora de las células de la pars distalis mediante factores en su mayoría peptídicos, que llegan a ese sector de la hipófisis a través de una conexión vascular especial, el sistema porta hipotálamo-hipofisario. La regulación de la actividad de la pars intermedia viene mediada por conexiones nerviosas que establecen contacto directo con las células de ese sector.

En 1955, Lerner y Lee, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Yale, aislaron y posteriormente determinaron la secuencia aminoacídica de dos péptidos melanotróficos provenientes de extractos de hipófisis de cerdo, a los que llamaron alfa y beta MSH, respectivamente, que corresponde a las siglas en inglés de la hormona estimulante de los melanocitos. Una de ellas, la alfa-MSH, posee 13 aminoácidos. Como ya se conocía la secuencia en que se suceden los aminoácidos que conforman la ACTH, se comprobó que la alfa-MSH era idéntica, salvo dos pequeñas modificaciones en sus dos aminoácidos terminales, a la secuencia de los trece primeros aminoácidos de ACTH. La similitud estructural de ambas hormonas las asemeja también en sus actividades biológicas: ACTH posee actividad melanotrófica y, viceversa, alfa-MSH muestra, aunque muy débilmente, actividad glucocorticosteroidogénica.

En la siguiente década de los sesenta, varios grupos describieron el hallazgo de cantidades apreciables de ACTH en la pars intermedia, lo que indujo a pensar que esta hormona podría ser el precursor biosintético de alfa-MSH en este sector de la hipófisis. Esta hipótesis fue reforzada por Phillip Lowry y colaboradores, en Londres, quienes hallaron, en 1973, un péptido de 23 aminoácidos aislado de partes intermedias de rata y cerdo, cuya secuencia era idéntica a los últimos 23 aminoácidos de ACTH; ello sugería que en este sector de la hipófisis la ACTH se escindía en dos: alfa-MSH, por un lado, y el péptido mencionado, por el otro, al que se llamaría CLIP. Entre medio de estos dos sectores queda un resto de tres aminoácidos que es digerido inmediatamente después del corte enzimático.

La segunda parte de la historia comienza en 1964 cuando Ho Chao Li, de la Universidad de California en San Francisco, a partir de hipófisis de cerdo aisló y posteriormente determinó la secuencia aminoacídica de un péptido de 91 aminoácidos, al que llamó beta-lipotrofina o beta-LPH, que promovía la movilización de los depósitos de lípidos del organismo. Inmediatamente se observó que al igual que lo que ocurría entre ACTH y alfa-MSH, la lipotrofina contenía en un sector de su molécula la secuencia completa de la otra melanotrofina antes aislada de la pars intermedia, beta-MSH. Se postuló que beta-LPH sería precursor de beta-MSH en ese sector de la hipófisis, donde obviamente también se la halló.

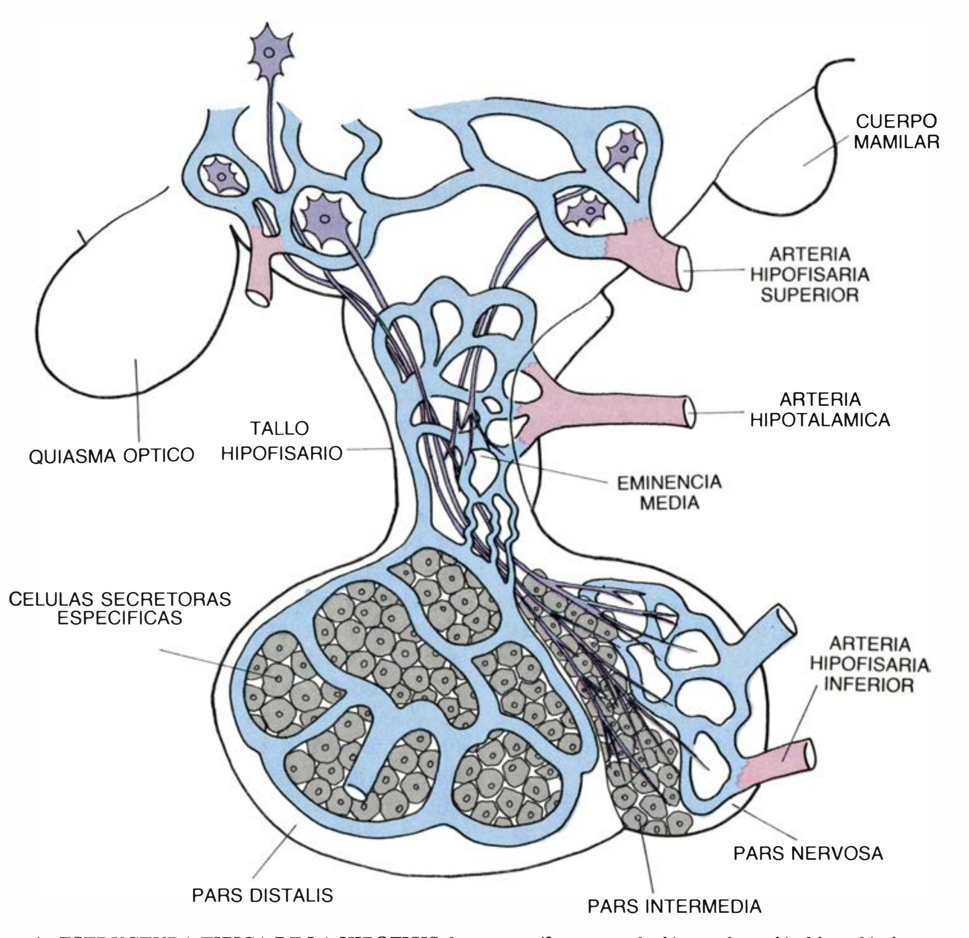
Hasta aquí no aparecen pruebas claras de la relación entre lipotrofina y ACTH, salvo en las similitudes de sus secuencias. Ahora bien, cuando pudo contarse con un método sensible de determinación de este nuevo péptido, se comprobó su asociación evidente con la ACTH, ya que sus niveles sanguíneos fluctuaban en concordancia con los de ACTH, cualesquiera fueran las variables experimentales utilizadas en animales de laboratorio o en diversas situaciones clínicas en el humano. Más aún, con el advenimiento de técnicas específicas de tinción inmunohistoquímicas, se comprobó que ambos, ACTH y beta-LPH, coexistían en el mismo tipo celular de la pars distalis: en las células corticotróficas.

Unos años más tarde, entre 1971 y 1975, Rosalyn Yalow y Solomon Berson, del hospital Mt. Sinai de Nueva York, detectaron, en extractos hipofisarios humanos y en tumores extrahipofisarios de la misma especie que producen ACTH, una proteína de alrededor de 30.000 dalton de peso molecular. (Un dalton equivale a la masa de un átomo de hidrógeno y es la unidad utilizada para expresar la masa de un átomo o molécula.) Esa proteína poseía algo de actividad corticosteroidogénica y tenía similitudes antigénicas con ACTH (o sea, era reconocida esta molécula por anticuerpos que reaccionaban contra ACTH), lo que hizo suponer que la secuencia de aminoácidos de ACTH, o al menos una parte importante de ella, estaba contenida dentro de la de esta proteína.

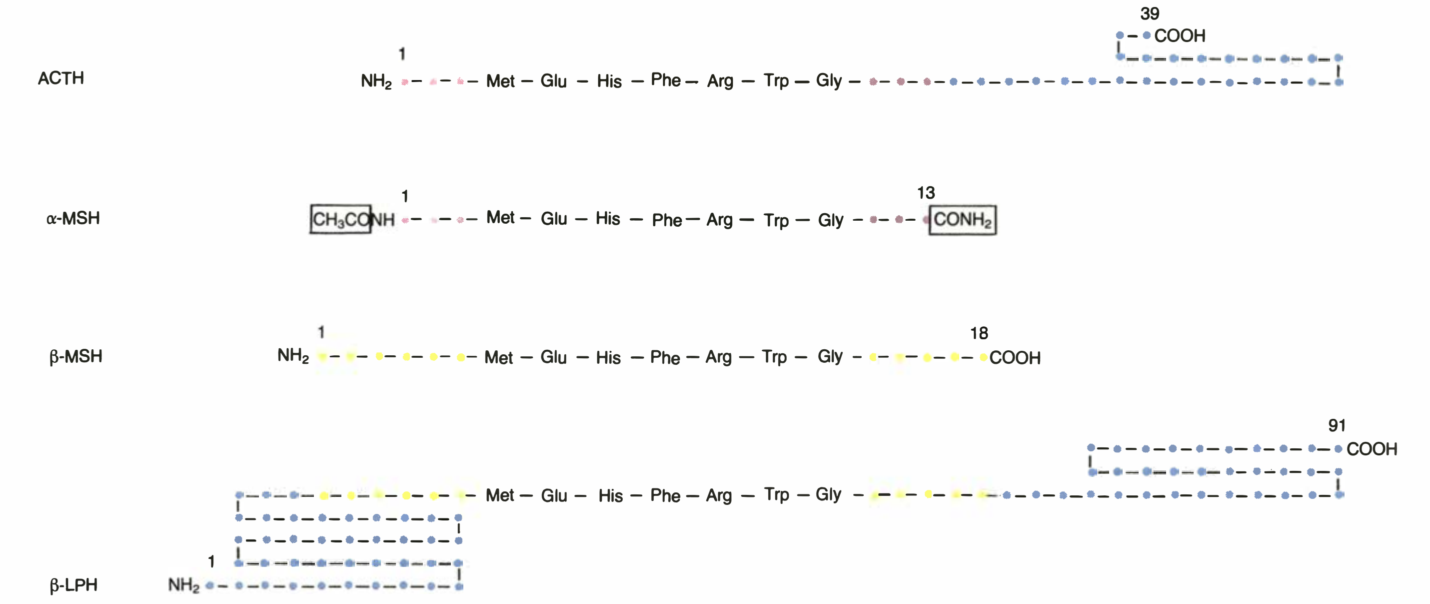
En 1975, Richard Mains y Betty Eipper, de la Universidad de Oregon en Portland, y, simultáneamente, el autor trabajando con Fermín Iturriza en la Facultad de Medicina de la Universidad de La Plata, describieron la presencia de material de similares características en la pars intermedia de la hipófisis del ratón, la rata y el sapo. A este material, al que se caracterizó como una proteína de 34.000 dalton de peso molecular, se le llamó "ACTH grande", en contraste con la ACTH clásica, cuyo peso molecular se cifra en 4500 dalton. A continuación, ambos grupos establecimos la naturaleza glucoproteica de la ACTH grande: la molécula posee un polisacárido adosado a su cadena polipeptídica.

El hallazgo que definitivamente vinculó las interrelaciones entre LPH, ACTH grande y ACTH, fue el realizado por Mains, Eipper y Ling, quienes demostraron que ACTH grande era el precursor biosintético común para ACTH y beta-LPH y, por ende, para las hormonas de la pars intermedia conocidas, es decir, alfa y beta-MSH. De ahí la presencia de la proteína precursora en ese sector de la glándula. Este precursor contiene la secuencia para beta-LPH, ACTH y además un segmento inicial de un centenar de aminoácidos, que es el que lleva adosada la porción glicosídica antes descrita.

Es obvio imaginar que el procesamiento del precursor, luego que ha sido sintetizado en el retículo endoplásmico rugoso de la célula, se realiza mediante enzimas proteolíticas que lo escinden en sitios específicos, produciendo ACTH, beta-LPH y el péptido correspondiente



1. ESTRUCTURA TIPICA DE LA HIPOFISIS de un mamífero y su relación con la región hipotalámica. Se han dibujado algunas neuronas productoras de factores hipofisiotróficos cuyos axones terminan contactando con los capilares del sistema porta hipotálamo-hipofisario, a la vez que se esquematizan algunas neuronas cuyos axones alcanzan los capilares de la pars nervosa; otras proyectan sus terminales hacia la pars intermedia, donde inervan sus células glandulares. Se ha simplificado la estructura histológica.



2. RELACIONES ESTRUCTURALES existentes entre los péptidos clásicos de la familia de la hormona adrenocorticotrófica, ACTH. Se especifican los aminoácidos que constituyen la secuencia heptapeptídica común a las cuatro hormonas que les confiere la actividad biológica distintiva y propia de cada una de ellas. En color se destacan los demás aminoácidos comunes en las secuencias de ACTH y alfa-MSH (*rojo*) y beta-MSH y beta-LPH (*amarillo*). Los recuadros que encierran a los grupos acetilo y amilo en alfa-MSH los indican las modificaciones en terminales amino y carboxilo de los aminoácidos.

al segmento inicial antes mencionado, al que se denominó péptido N-terminal del precursor común para ACTH y LPH. La denominación de N-terminal proviene de amino-terminal, ya que al ser la parte inicial de la proteína (extremo por donde comienza la síntesis), el primer aminoácido de la cadena permanece con su grupo amino (-NH_2) libre uniéndose al aminoácido siguiente por su grupo carboxilo. Recíprocamente, la última porción de un péptido o una proteína se denomina C-terminal por tener el último aminoácido de la cadena su carboxilo (-COOH) libre.

El corte enzimático del precursor se realiza con extraordinaria precisión, ya que sólo ciertas uniones peptídicas (las uniones que vinculan un aminoácido con el contiguo en la cadena polipeptídica) son atacadas por las enzimas. Estas tienen predilección por los sitios donde existen dos aminoácidos dibásicos consecutivos, tales como dos lisinas o dos argininas juntas, o una lisina y una arginina. Ahora bien, el precursor no es atacado simultáneamente en todos los sitios susceptibles, sino que el procesamiento se produce por etapas.

La primera acción enzimática genera beta-LPH y una proteína de 24.000 dalton de peso molecular, que contiene las secuencias completas de ACTH y la porción N-terminal. Inmediatamente ocurre un nuevo corte en otro de los sitios de ataque, originándose ACTH y la porción N-terminal íntegra (N POMC 103). En esta etapa, las moléculas del precursor se han escindido casi del todo en los tres péptidos mencionados, que son los productos de secreción principales de las células corticotróficas. Además, algunas moléculas correspondientes al péptido N-terminal y a LPH se escinden de nuevo generándose dos péptidos derivados de la porción N-terminal (N-POMC-76 y un residuo de 30 aminoácidos) y dos derivados de beta-LPH (gama-LPH y beta-endorfina), segregados por las células corticotróficas. A partir de aquí, en estas células no prosigue el procesamiento.

En la pars intermedia todos los sitios restantes quedan escindidos, en mayor o menor medida, generándose cuatro péptidos derivados de la porción N-terminal; dos, a partir de ACTH (alfa-MSH y CLIP), y tres se derivan de beta-LPH (un fragmento N-terminal de LPH, beta-MSH y endorfina). La beta endorfina pertenece a un grupo de péptidos que ejercen efectos similares a los producidos por los alcaloides derivados del opio, por cuya razón reciben el nombre genérico de opiáceos endógenos. Este último efecto, la actividad melanotrófica que ejercen las MSH y, en tercer lugar, la acción corticosteroidogénica de la ACTH, concurren en el apelativo del precursor: Pro-opiomelanocortina; de ahí las siglas POMC utilizadas para nombrar al precursor y a los péptidos derivados de su porción N-terminal (N-POMC).

¿Por qué sólo se atacan ciertos sitios con pares de aminoácidos dibásicos? Los experimentos realizados por Peng Loh y Harold Gainer, en la sede del Instituto Nacional de la Salud en Bethesda, hallan la razón en la presencia de la porción glicosídica en la proopiomelanocortina que protegería ciertos sitios, dejando expuestos otros. Incubaron glándulas de sapo con tunicamicina, un antibiótico que inhibe selectivamente el proceso de glicosilación de las proteínas, y analizaron luego los péptidos derivados del precursor. Se observó que éste había sido digerido indiscriminadamente, por lo que supusieron que era la porción glicosídica la que protegía algunos sitios de ataque y dejaba otros expuestos.

El autor se inclina por un rol más selectivo de las enzimas procesadoras en uno u otro tipo celular, pudiendo atribuirse al glúcido una función protectora contra otras enzimas celulares menos específicas. Esto último se apoya en los estudios realizados en el Centro de Estudios Endocrinos de la Facultad de Medicina de La Plata, por el autor y Fermín Iturriza, en hipófisis de peces, de acuerdo con los cuales los glúcidos no importarían en el procesamiento del precursor. Cuando se comparan los distintos péptidos segregados por las células corticotróficas de hipófisis de rata con los que producen el mismo tipo celular de la hipófisis en el pez teleósteo sábalo, se observa que el tamaño de los péptidos originados del precursor, así como la proporción relativa en que son segregados en ambas especies, se asemeja notablemente. Esto equivale a decir que el procesamiento es muy similar en ambas espe-

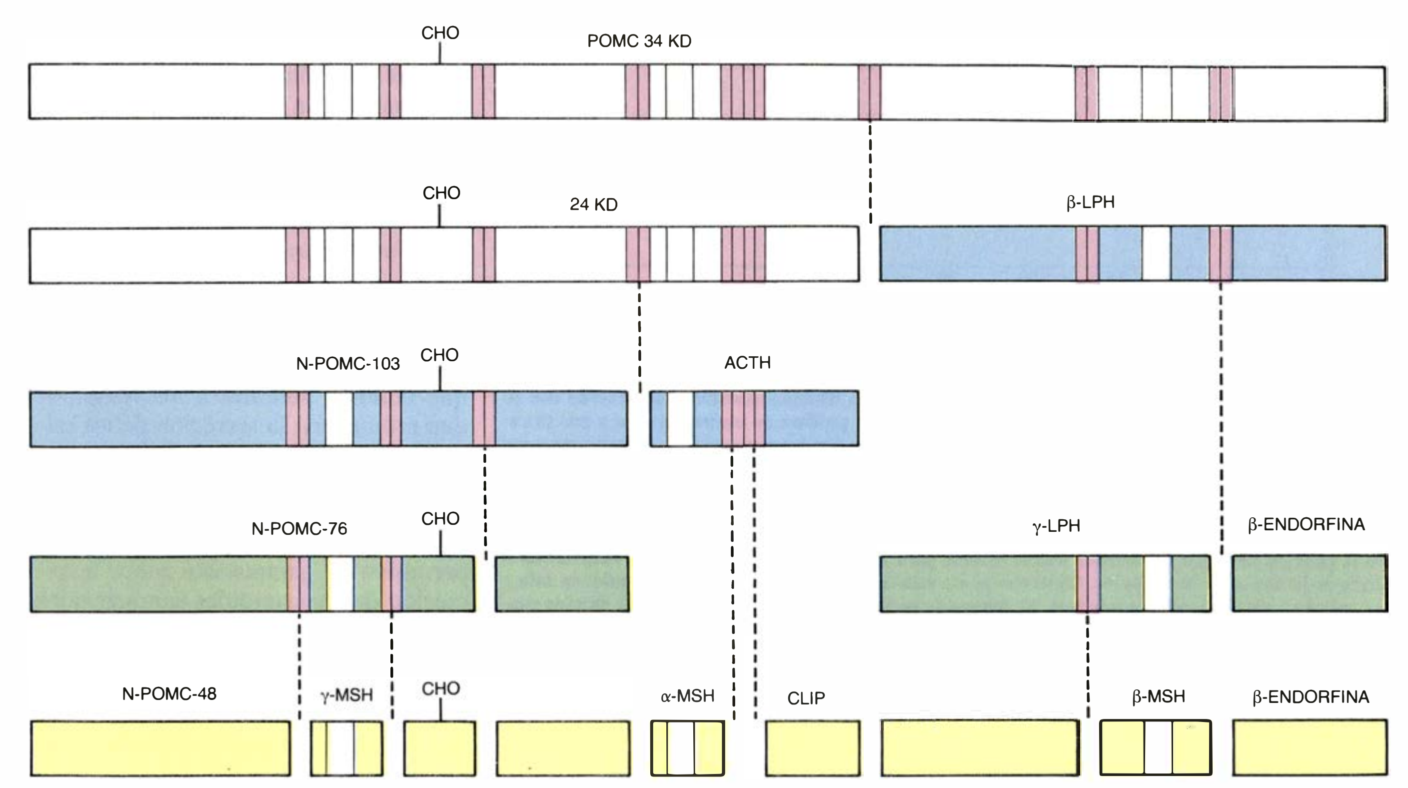
cies. Uno y otro precursor poseen un tamaño parejo.

Pero la diferencia sobreviene cuando se considera su contenido glicosídico: si se incuban glándulas de rata y pez con monosacáridos radiactivos, por ejemplo glucosamina tritiada, ésta se incorpora a las glucoproteínas que son neosintetizadas por el tejido. Luego de la incubación, se someten a precipitación los extractos de las glándulas, utilizando anticuerpos específicos contra los diferentes péptidos que origina el precursor. Por tanto, como se precipitan sólo los anticuerpos y los péptidos por ellos reconocidos, si existe radiactividad en los precipitados se deberá a que el azúcar se ha incorporado al precursor y, por ende, a los productos de su procesamiento. En los inmunoprecipitados de los incubados de rata se detecta una apreciable cantidad de radiactividad, mientras que en el pescado sólo se detectan trazas de la misma. Significa ello que la POMC de los peces no está glicosilada, si bien el procesamiento es casi idéntico al que se observa en mamíferos.

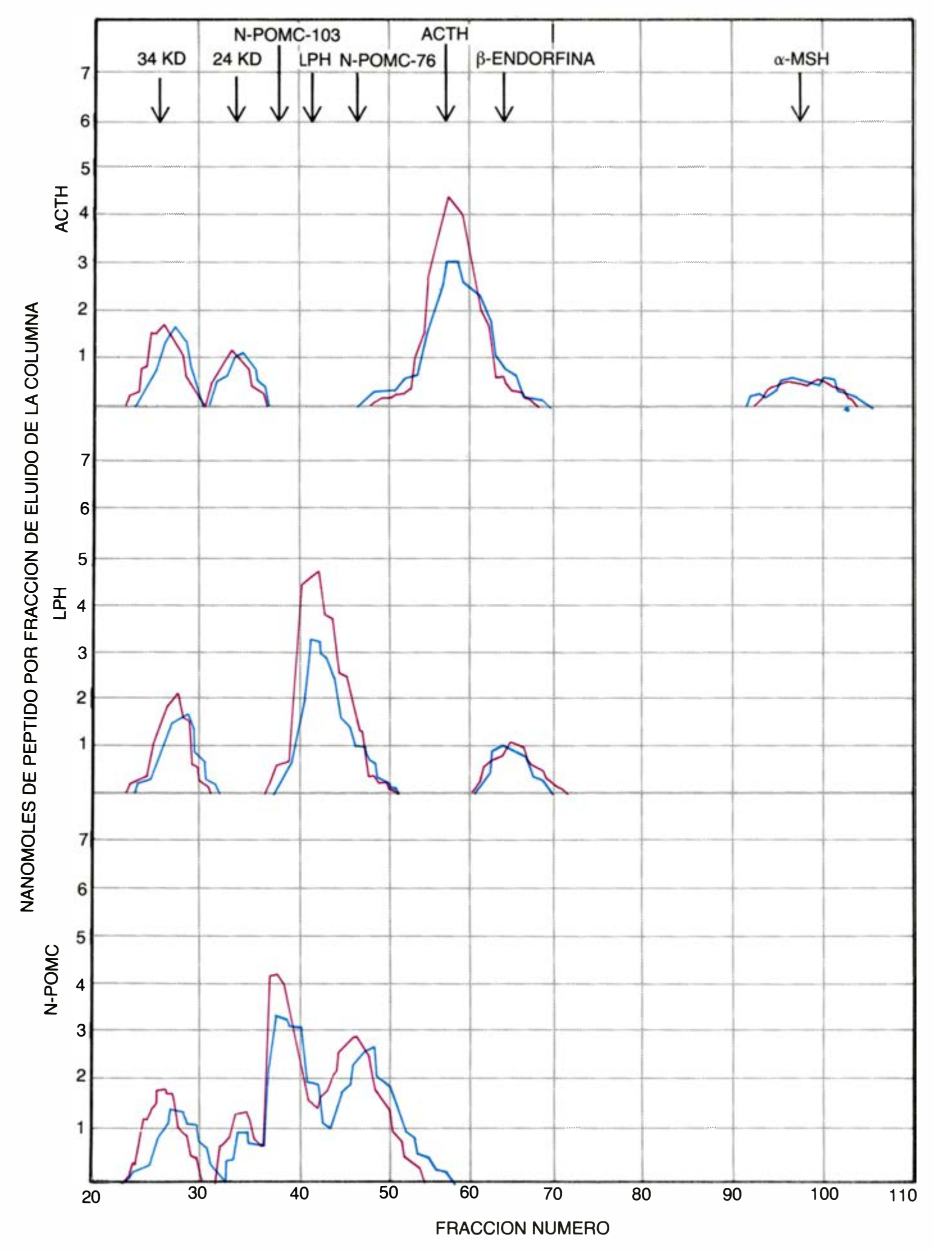
El ataque enzimático sobre el precursor comienza en el aparato de Golgi, que es el orgánulo celular encargado del empaquetamiento del material a segregar por la célula, proveyéndolo de una envoltura membranosa que lo convierte en un gránulo de secreción, almacenado en el citoplasma hasta el momento en que ésta se produzca. La actividad de las enzimas continúa aún en el gránulo de secreción, pero la acción de éstas es limitada, ya que casi siempre existe algo de precursor sin procesar que se segrega intacto. El procesamiento del precursor es diferente en las células corticotrofas de la pars distalis y en las melanotrofas de la pars intermedia. En estas últimas, el procesamiento enzimático, más completo, produce mayor número de péptidos a expensas de los grandes.

De todos los péptidos que pueden originarse a partir de pro-opiomelanocortina, hemos mencionado los efectos hormonales atribuidos a algunos de ellos. De estos péptidos, la ACTH es la que primero se reconoció como hormona; luego le siguieron alfa y beta-MSH, cuyo papel en el control de la dinámica pigmentaria en la piel de los vertebrados inferiores está bien determinado. En la gran mayoría de las especies de mamíferos, estos péptidos se producen y circulan por la sangre en concentraciones apreciables, con diferentes propiedades biológicas. La beta-MSH y sus precursores inmediatos, la gamma y beta-LPH, estimulan, según se cree, la secreción de un grupo de hormonas esteroideas producidas por la zona externa (glomerulosa) de la corteza adrenal. Este grupo de hormonas, los mineralocorticoides, promueve la resorción de sodio de la orina en formación en el riñón, evitando la pérdida excesiva de este catión por el organismo.

Los efectos glucocorticosteroidogénicos y mineralocorticosteroidogénicos, los melanotróficos, lipolíticos y otros, se deben a una secuencia de siete aminoácidos, común y repetitiva en todos estos péptidos, que es la que les confiere las respectivas propiedades hormonales. Otros péptidos derivados de POMC con acción hormonal son las endorfinas, que se derivan de la porción C-terminal de beta-LPH. Poseen una señal que les confiere la actividad biológica característica (un pentapéptido que comparten ciertos neurotransmisores: las encefalinas).



3. PROCESAMIENTO DEL PRECURSOR COMUN para ACTH y su familia de péptidos, denominado pro-opiomelanocortina (POMC). En la parte superior se esquematiza la POMC; hacia abajo y en la secuencia en que se suceden, se exponen los pasos del procesamiento enzimático que va fragmentando a los péptidos mayores. En azul se denotan aquellos péptidos que constituyen los productos principales de secreción de las células corticotróficas de la pars distalis; en verde, los péptidos originados a partir de los anteriores que las células corticotróficas también segregan; en amarillo, los formados en el último paso del procesamiento que ocurre en la pars intermedia y, por tanto, son los productos principales de secreción de ese sector de la hipófisis. Las líneas verticales punteadas indican los sucesos de ataque enzimático que conducen al paso siguiente del procesamiento. Estos ocurren donde hay pares de barras (*color rosado*) que señalan la ubicación de los aminoácidos dibásicos consecutivos. Los sectores en blanco señalan la posición de la secuencia heptapeptídica repetitiva. CHO recuadrado corresponde a la cadena glicosídica adosada a la porción N-terminal del precursor. En las moléculas precursoras se indica el peso molecular en kilodalton (KD). Los péptidos que se originan a partir de la región N-terminal del precursor se designan por las siglas N-POMC seguidas de una cifra que corresponde al número de aminoácidos que lo conforman. No se les ha asignado nombre a los péptidos que no se describen en el texto.



4. PERFIL CROMATOGRAFICO DE PEPTIDOS derivados de pro-opiomelanocortina extraídos de pars distalis de hipófisis de rata (*rojo*) y de su equivalente en el pez sábalo (*azul*). Los extractos se eluyen a través de una columna que contiene una resina que filtra las distintas sustancias de acuerdo con su tamaño molecular. El fenómeno de separación por tamaños se produce de manera inversa a una filtración, ya que los péptidos mayores atraviesan la columna antes que los menores. Los precursores y sus productos de procesamiento se detectan por tres sistemas diferentes de radioinmunoensayo que reconocen cada una de las tres regiones principales del precursor, a saber, ACTH, LPH y porción N-terminal. Según puede apreciarse, el pico correspondiente al precursor (34 kilodalton) es detectado por los tres sistemas, pues posee las tres secuencias reconocidas por cada uno de los sistemas de detección. El pico que coincide con la posición de 24KD lo reconoce sólo el sistema para ACTH y N-terminal, ya que ese intermediario carece de la secuencia de beta-LPH. Obsérvese la estrecha similitud de los péptidos detectados en rata y pez, así como sus proporciones relativas. El sistema de radioinmunoensayo para ACTH está dirigido contra la porción N-terminal de la molécula, por lo que además del pico correspondiente a ACTH detecta pequeñas cantidades de alfa-MSH presentes en los extractos de pars distalis de ambas especies. Algo parecido sucede con beta-endorfina, ya que el sistema utilizado para valorar LPH reconoce el sector C-terminal de la misma; así, aparte de LPH, detecta apreciables cantidades de endorfina en rata y pez.

Hasta 1979 no se conocía la secuencia de aminoácidos de la porción N-terminal de POMC, año en el que Shigetada Nakanishi y colaboradores, de la Universidad de Kyoto, y Stanley Cohen, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford, determinaron la secuencia completa del precursor por métodos de ingeniería genética, mediante la dilucidación de la secuencia de nucleótidos del ARN mensajero aislado de hipófisis de bovinos, que codifica la secuencia de aminoácidos del precursor. En ella, dentro de una porción de la región N-terminal flanqueada por pares de residuos dibásicos, descubrieron una tercera secuencia heptapeptídica casi idéntica a las contenidas en LPH y ACTH. A esta porción la llamaron gamma-MSH, por asemejarse en tamaño y composición a las demás melanotrofinas. Poco después se sintetizó este fragmento. Se comprobó que detentaba actividad melanotrófica en la piel de los anfibios. Podía esperarse también, a semejanza de lo ocurrido con las otras melanotrofinas, que esta nueva MSH ejerciera un efecto hormonal diferente en los mamíferos, y así ocurrió, en efecto.

En 1980, Robert Pedersen y Alexander Brownie, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Nueva York en Buffalo, y poco después el grupo que integraba el autor en el hospital Sant Bartholomews de la capital londinense describimos para una de las porciones del sector N-terminal de propiomelanocortina un efecto potenciador de la acción de ACTH sobre las células del sector medio (zona fasciculata) de la corteza suprarrenal que segrega los glucocorticoides. En estas experiencias, en las que se utilizaron incubados de células dispersas de adrenal de rata, se comprobó que el efecto potenciador lo ejercían la gamma-MSH o péptidos mayores pertenecientes a la porción N-terminal que contenían la porción heptapeptídica. Este nuevo efecto atribuido a un péptido portador de dicha secuencia de aminoácidos no se observó para las otras ya conocidas melanotrofinas, confirmando la idea según la cual el entorno aminoacídico que posee la secuencia heptapeptídica es esencial para determinar la especificidad de las actividades hormonales de cada péptido.

El efecto potenciador descrito no se limita a los glucocorticoides, sino que también potencia a los estímulos que promueven la secreción de los mineralocorticoides desde la zona glomerulosa de la corteza adrenal, como los ejercidos por beta-LPH y beta-MSH, además de las angiotensinas. Este efecto permisivo de gamma-MSH sobre la secreción de los esteroides suprarrenales se explicaría por la capacidad que tiene el péptido de activar una enzima celular que es la responsable de hidrolizar a ésteres del colesterol; al promover así la disponibilidad de este esteroide se da el primer paso en la cadena metabólica de biosíntesis de todas las hormonas esteroideas: glucocorticoides, mineralocorticoides y hormonas sexuales.

El nombre de corticotrofina o ACTH no es el que mejor describe la función fisiológica de esta hormona, que es la de estimular la producción y secreción de glucocorticoides. De hecho, la admi-

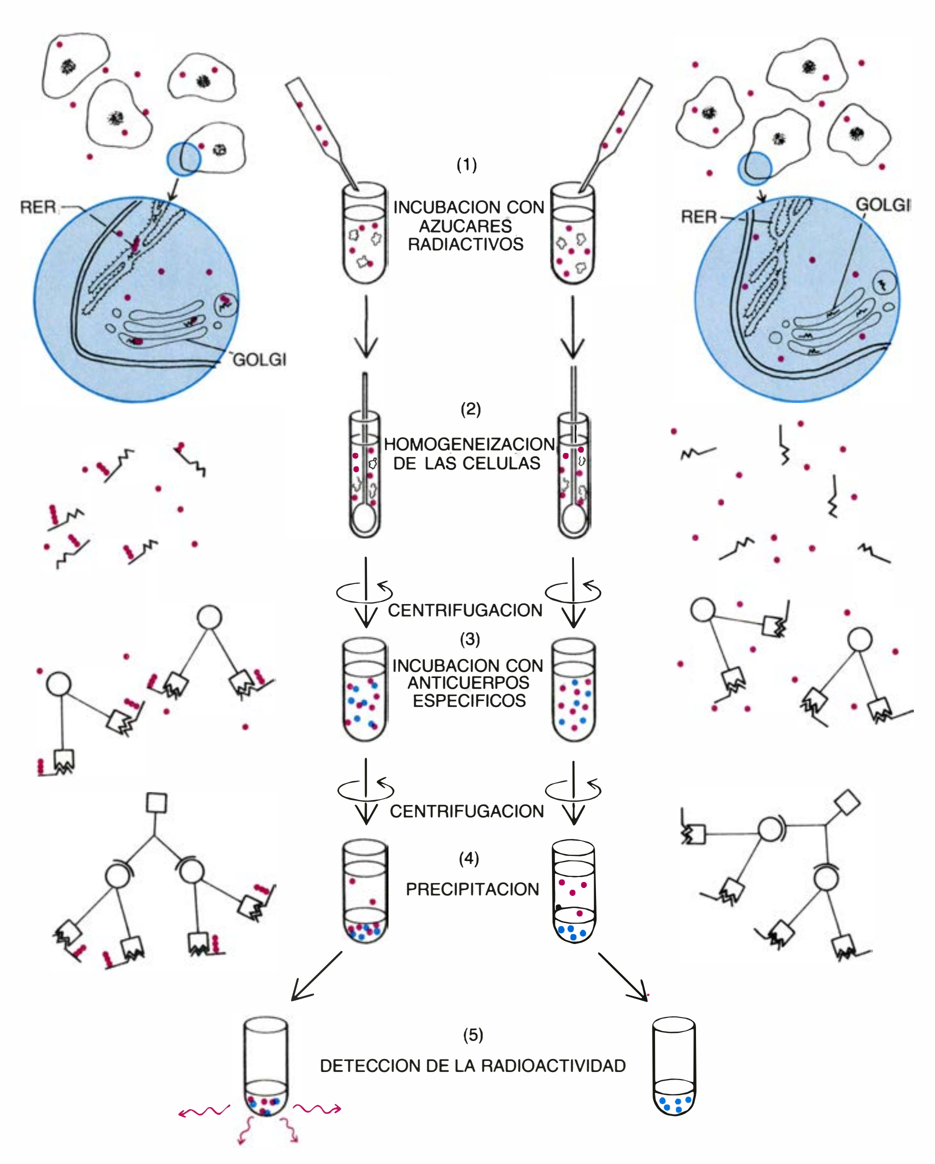
nistración de ACTH es capaz de producir hipertrofia, es decir, aumento de tamaño de las glándulas suprarrenales. Se creía, sin embargo, en la existencia de otro factor o factores cuya acción sería trófica, produciendo un efecto proliferativo-mitogénico sobre la corteza suprarrenal. Se habían postulado, para esa misión, otras hormonas conocidas. Ahora bien, cualquiera que fuera el factor involucrado, guarda estrecha relación con ACTH.

A partir de 1980, en el Centro de Estudios Endocrinos de la Facultad de Medicina de la Universidad de La Plata, comenzamos a probar el efecto mitogénico de algunos fragmentos de la porción N-terminal de POMC humana, aislados por el autor y por James Hope, Phillip Lowry y Charles Mc Lean, del hospital Saint Bartholomews en Londres. Para ello se diseñaron ensayos *in vivo* e *in vitro*. Los primeros consistieron simplemente en administrar los péptidos en forma crónica a ratas y posteriormente medir los efectos, evaluando el crecimiento de la glándula, ya sea por el aumento de peso de la misma, por el incremento en el número de mitosis observables en cortes histológicos o por el aumento en la incorporación de timidina radiactiva al ADN del tejido adrenal.

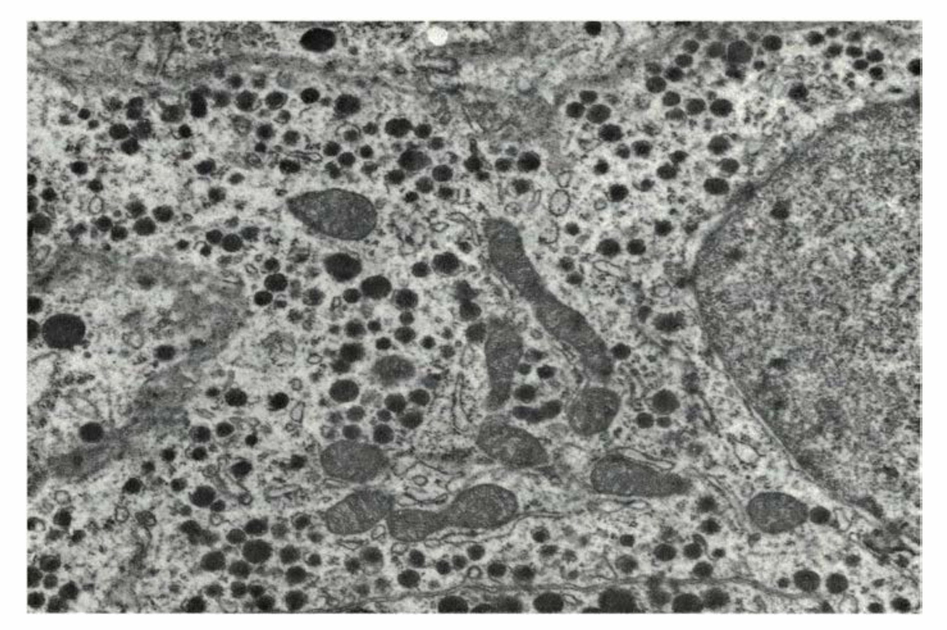
Los resultados obtenidos en los comienzos fueron desalentadores: el primer fragmento N-terminal de POMC que se obtuvo en estado puro proveniente de hipófisis humanas y que consistía en los primeros 76 aminoácidos de esta porción del precursor, era inactivo *in vitro* y con escasa actividad *in vivo*. Se pensó entonces en la posibilidad de que hubiera péptidos más pequeños que pudieran tener efecto mitogénico. Para probar esa hipótesis, se sometió al péptido de 76 aminoácidos N-POMC-76 a una digestión suave con tripsina, que es una enzima proteolítica de origen pancreático. Esta enzima corta las cadenas peptídicas donde se encuentran aminoácidos dibásicos y tiene predilección por aquellos sitios donde existen pares de aminoácidos dibásicos consecutivos, poseyendo entonces especificidad similar a las enzimas presentes en las células corticotróficas y melanotróficas de la hipófisis. De tal manera podría producirse en el tubo de ensayo un procesamiento de N-POMC-76, similar al que ocurre con esa región del precursor en dichas células.

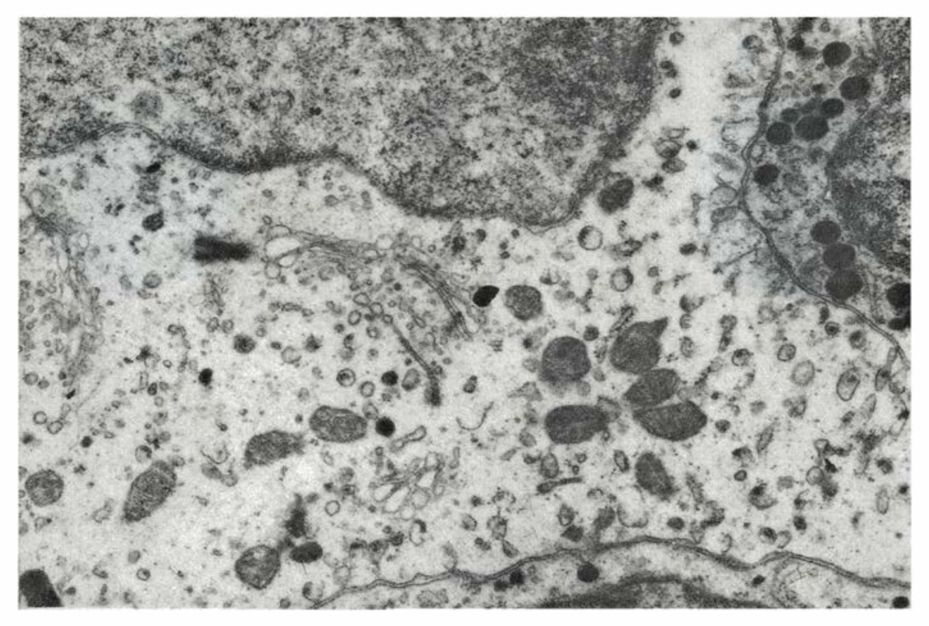
Existen, en efecto, pares de aminoácidos dibásicos consecutivos en posiciones 49-50 y 63-64 respectivamente, susceptibles de ser atacados por la tripsina liberando un péptido de 48 aminoácidos (N-POMC-48) por un lado, y gamma-MSH y otro péptido por el otro. Cuando se inyectó el producto de la digestión tripsínica en iguales condiciones en las que el péptido intacto había fracasado, , se observó un marcado aumento de la proliferación celular en las glándulas suprarrenales. Tiempo después obtuvimos por purificación de extractos hipofisarios humanos péptidos más pequeños, derivados de N-POMC entre los que se encontraba N-POMC-48, y comprobamos que éstos presentaban un gran poder mitogénico *in vivo* e *in vitro*.

De todos modos, la demostración de que estas sustancias pueden estimular la mitogénesis corticoadrenal no implica, necesariamente, que estén involucradas en el control fisiológico natural de la proliferación y crecimiento adrenal. Por ese motivo se planearon otro tipo de ensayos: en crías de rata, en las que la corteza suprarrenal se encontraba en plena proliferación, se inyectó suero de conejo, al que se había inmunizado con N-POMC-48 y que posee un alto título de anticuerpos que reconocen, y por tanto neutralizan específicamente, esa porción de N-POMC. También se inyectó en otro grupo de crías un suero de conejo altamente rico en anticuerpos anti-ACTH. Al término del período de administración, se compro-



5. PRESENCIA DE GLUCIDOS en la molécula de pro-opiomelanocortina, y ensayo también sobre su ausencia. A la izquierda se esquematiza lo que sucede con las células corticotróficas de la rata y a la derecha con sus equivalentes en el pez. En el centro se representan los pasos metodológicos del experimento: se incuban células corticotróficas de rata y pez con azúcares radiactivos; éstos son captados por las células en las que se está sintetizando el precursor y se incorporan al mismo en las corticotróficas de la rata, pero no del pescado (*1*). A continuación, se homogeneizan las células, quedando las moléculas de azúcar y precursor en solución (*2*). Luego de separar los restos celulares insolubles por centrifugación, se agrega un anticuerpo específico, que reconoce al precursor, y se incuba por algunas horas (*3*). Se vuelve a incubar tras agregar un segundo anticuerpo dirigido contra las moléculas del primer anticuerpo para precipitar el conjunto (*4*); éste se centrifuga y lava para evitar la presencia de azúcares radiactivos no incorporados al precursor (*5*). Finalmente, se detecta y cuantifica la radiactividad incorporada (*6*).





6. FUNCION DE LAS CELULAS CORTICOTROFICAS en las situaciones de alerta o estrés. Arriba se observa un sector de una célula corticotrófica de pars distalis de rata cuyo citoplasma contiene gran cantidad de gránulos de secreción (*cuerpos redondeados oscuros*). En el sector derecho se ve parte del núcleo de forma ovoide. La hipófisis proviene de un animal al que se sacrificó estando en reposo. La fotografía de abajo muestra una célula corticotrófica de una rata, sometida a un intenso estrés antes del sacrificio. En el citoplasma se ven algunos organoides y vesículas claras, pero no se observan gránulos de secreción, ya que se han eliminado durante la intensa actividad secretora de la célula a causa del estrés. Se distingue parte del núcleo en la parte superior izquierda. Los cuerpos ovoides oscuros que se observan, arriba a la derecha, pertenecen a gránulos de secreción de una célula perteneciente a otro tipo celular de la glándula. La preparación fue realizada por César L. A. Gómez Dumm, del Instituto de Embriología, Biología e Histología de la Facultad de Ciencias Médicas de la Universidad Nacional de La Plata.

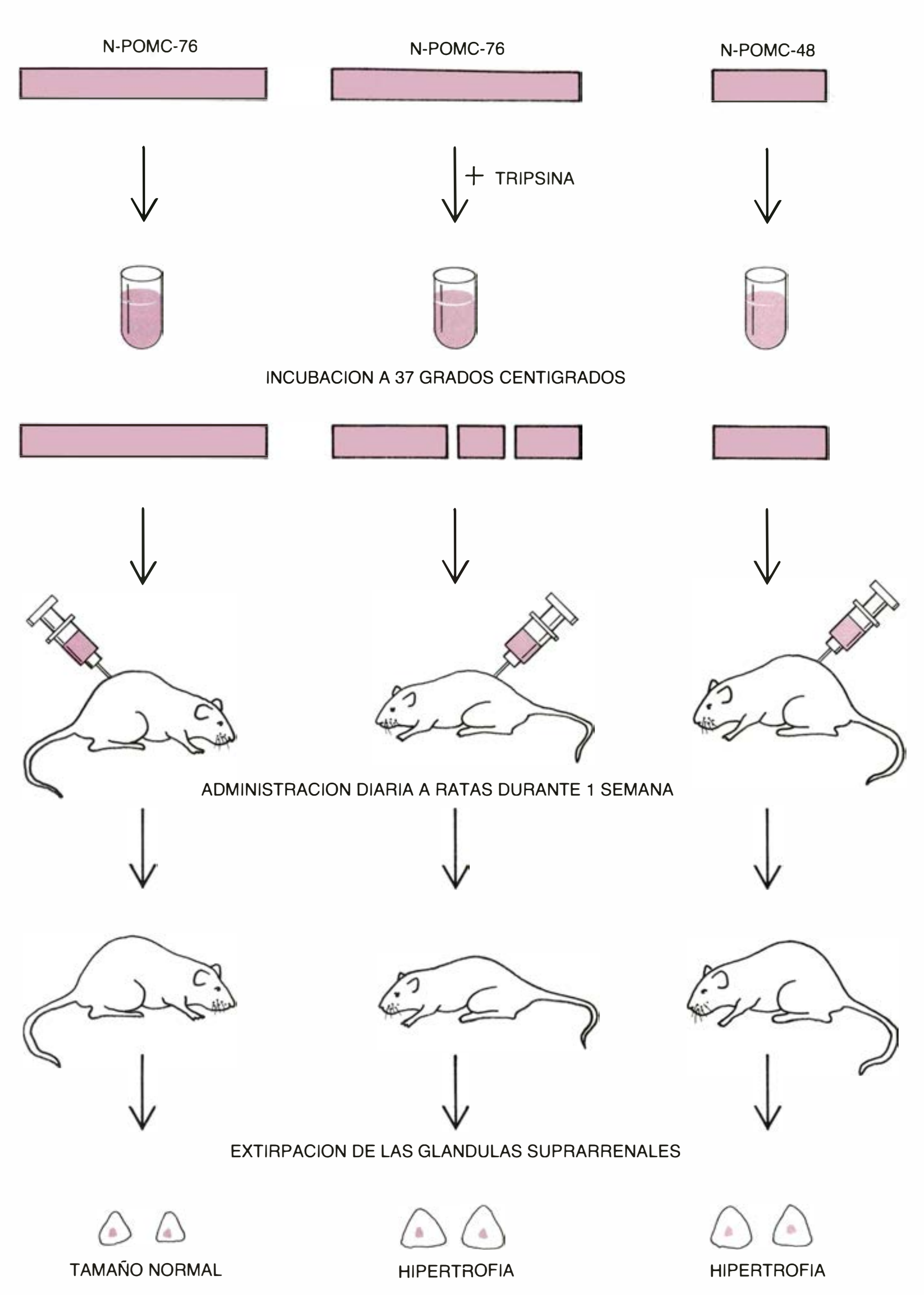
bó que las crías que habían recibido el anticuerpo específico contra N-POMC-48 mostraban un retardo considerable en el crecimiento de sus glándulas suprarrenales. Por el contrario, los que habían recibido el suero anti-ACTH no mostraban cambio alguno en el tamaño de sus glándulas cuando se las comparó con los animales controles que habían recibido inyecciones de un suero normal de conejo. En cambio, como era de esperar, los niveles sanguíneos de corticosterona en el grupo al que se le había administrado el suero anti-ACTH estaban disminuidos.

Si se acepta que los anticuerpos administrados a las crías de rata neutralizan el efecto fisiológico de los péptidos circulantes contra los que reaccionan específicamente, se puede concluir que los péptidos derivados de la porción más extrema N-terminal de POMC están involucrados en el control fisiológico del crecimiento adrenal. Estos experimentos permiten concluir también que ACTH, aunque con acción trófica cuando se la administra en cantidades suficientes, no es el factor preponderante en la estimulación del crecimiento de la corteza adrenal en condiciones normales. Los resultados obtenidos permitirían asignar un nuevo efecto fisiológico a los péptidos derivados de propiomelanocortina. Cabe acotar que la actividad mitogénica descrita no está asociada a una porción heptapeptídica, ya que el sector N-terminal de POMC que muestra esa actividad no posee tal secuencia de aminoácidos.

¿Cuál es el sector de la hipófisis involucrado en el control del crecimiento o trofismo adrenal? La pars intermedia produce, recuérdese, los péptidos más pequeños derivados de la porción N-terminal del precursor, que son los que poseen la actividad mitogénica. A pesar de esto, no se descarta un papel importante de las células corticotróficas de la pars distalis, que a pesar de producir en mayor proporción los péptidos mayores que son inactivos, podrían originar indirectamente péptidos menores, sea por la acción de enzimas presentes en la sangre o una vez que han alcanzado la corteza suprarrenal, o por medio de enzimas liberadas por el tejido. Tal debería ser el caso en el ser humano durante la vida post-natal, ya que la pars intermedia desaparece a los pocos días y el precursor sólo lo producen las células corticotróficas en la pars distalis.

Los péptidos, incluyendo algo de precursor, coexisten en el mismo gránulo de secreción. Considerando que es el contenido del gránulo *in toto* el que se expulsa en el proceso secretorio, ¿cómo se regula la secreción de cada péptido? ¿Existe un control diferencial que modula separadamente la secreción de unos y otros? Y de ser así, ¿cómo se realiza? La secreción de las hormonas de la pars distalis de la hipófisis está controlada por factores u hormonas (hormonas hipofisiotróficas) producidas por células nerviosas del hipotálamo, cuyos axones terminan en el piso de esta estructura cerebral, el que se encuentra en contacto con el tallo hipofisario. Allí, estos terminales descargan los factores mencionados hacia las redes capilares de un sistema vascular especial, denominado sistema porta hipotálamo-hipofisario, compuesto por dos plexos capilares unidos por troncos venosos que transcurren por el tallo hipofisario. La primera capilarización tiene lugar en el piso del hipotálamo; la segunda riega la hipófisis anterior y asegura la provisión de esos factores a las células que ellos controlan.

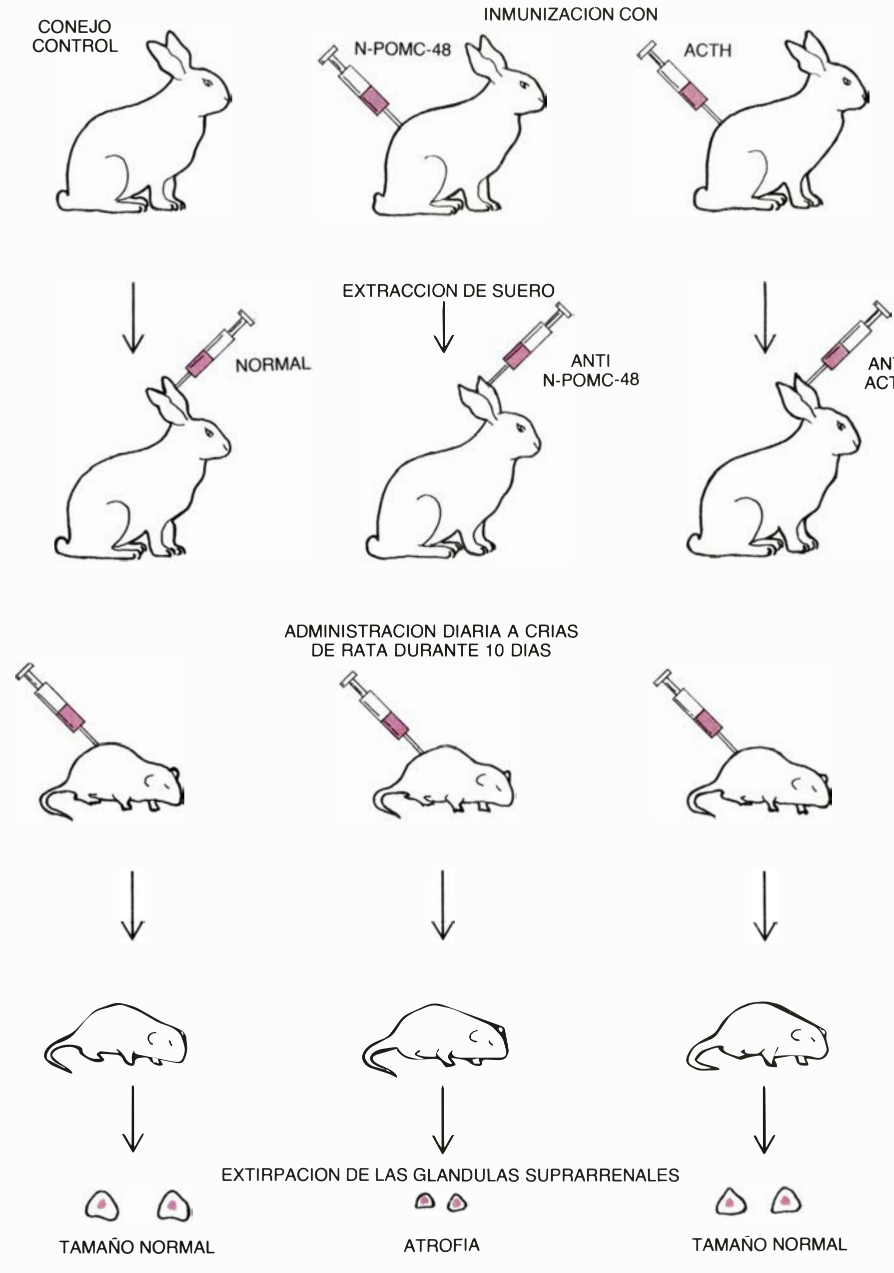
En el caso de las células corticotróficas, desde hace treinta años, se postuló la existencia de un factor liberador de ACTH, pero hasta muy recientemente no logró esbozarse una idea más o menos clara acerca de la naturaleza de ese control. En 1981, Willy Vale y colaboradores, del Instituto Salk en La Jolla, California, aislaron de extractos hipotalámicos de oveja un polipéptido de 41 aminoácidos que ejerce un potente estímulo de liberación de ACTH; le llamaron factor liberador de corticotrofina o FLC-41. Pero ya antes de aislarse el FLC-41 se había establecido, merced fundamentalmente a hallazgos de Glenda Gillies y Phillip Lowry, del hospital Saint Bartholomews de Londres, que la vasopresina, péptido neurohipofisario cuyo efecto hormonal más conocido es el de promover la retención de agua por el riñón, se comportaba también como un estimulador fisiológico de la secreción de ACTH. Vasopresina y FLC-41 actúan al unísono en la estimulación de la secreción de esta hormona, siendo probable que existan otros estímulos que promuevan también la secreción de ACTH.



7. ACCION TROFICA SOBRE LAS GLANDULAS SUPRARRENALES de péptidos derivados de la porción N-terminal de pro-opiomelanocortina. A la izquierda se ilustran los ensayos iniciales en los que se utilizó el péptido N-terminal de 76 aminoácidos (N-POMC-76); el que inyectado crónicamente en ratas no produjo efectos evidentes sobre el trofismo de las glándulas suprarrenales. En el centro se resumen las experiencias posteriores en las que se trató N-POMC-76 con tripsina. Se esquematizan los cortes que se esperaba hiciera la tripsina sobre el péptido mayor originando fragmentos más pequeños, entre otros el péptido de 48 aminoácidos (N-POMC-48). La mezcla inyectada en ratas produjo un aumento notable en el tamaño de las glándulas. En la columna de la derecha se utilizó el fragmento N-POMC-48 purificado, que también produjo hipertrofía de las suprarrenales cuando se lo suministró a ratas en forma crónica.

Pero lo que debemos responder es qué es lo que ocurre con los otros péptidos manufacturados a partir del precursor ante los estímulos que controlan la secreción de ACTH. Tales interrogantes fueron desvelados por ensayos llevados a cabo por el grupo de Roger Guillemin, en el Instituto Salk, y simultáneamente por el autor, siendo becario postdoctoral en el hospital Saint Bartholomews, en Londres, en 1978, conjuntamente con Glenda Gillies y Phillip Lowry, y posteriormente en el Centro de Estudios Endocrinos de La Plata.

En los ensayos conducidos por el autor, se utilizó un sistema de perfusión continua de células dispersas de pars distalis de hipófisis de rata. Las diferentes sustancias a testificar se perfunden en forma de pulsos y el líquido que eluye de la columna contiene las hormonas segregadas por las células en respuesta a los distintos estímulos; las hormonas se valoran por radioinmunoensayo. Se trata en definitiva de agregar a la muestra que contiene la hormona a determinar una cantidad fija y medida de la misma hormona, marcada químicamente con átomos radiactivos. Esta mezcla se incuba con un anticuerpo específico, que reconoce y se une a la hormona en cuestión, sin distinguir entre la radiactiva y la que no lo es. Como la cantidad de anticuerpo agregado es tal que sólo alcanza para unirse a una fracción del total de hormona presente en el tubo de incubación, ya sea radiactiva o no, se detectará más o menos radiactividad en la fracción de anticuerpo según la cantidad de hormona a determinar.

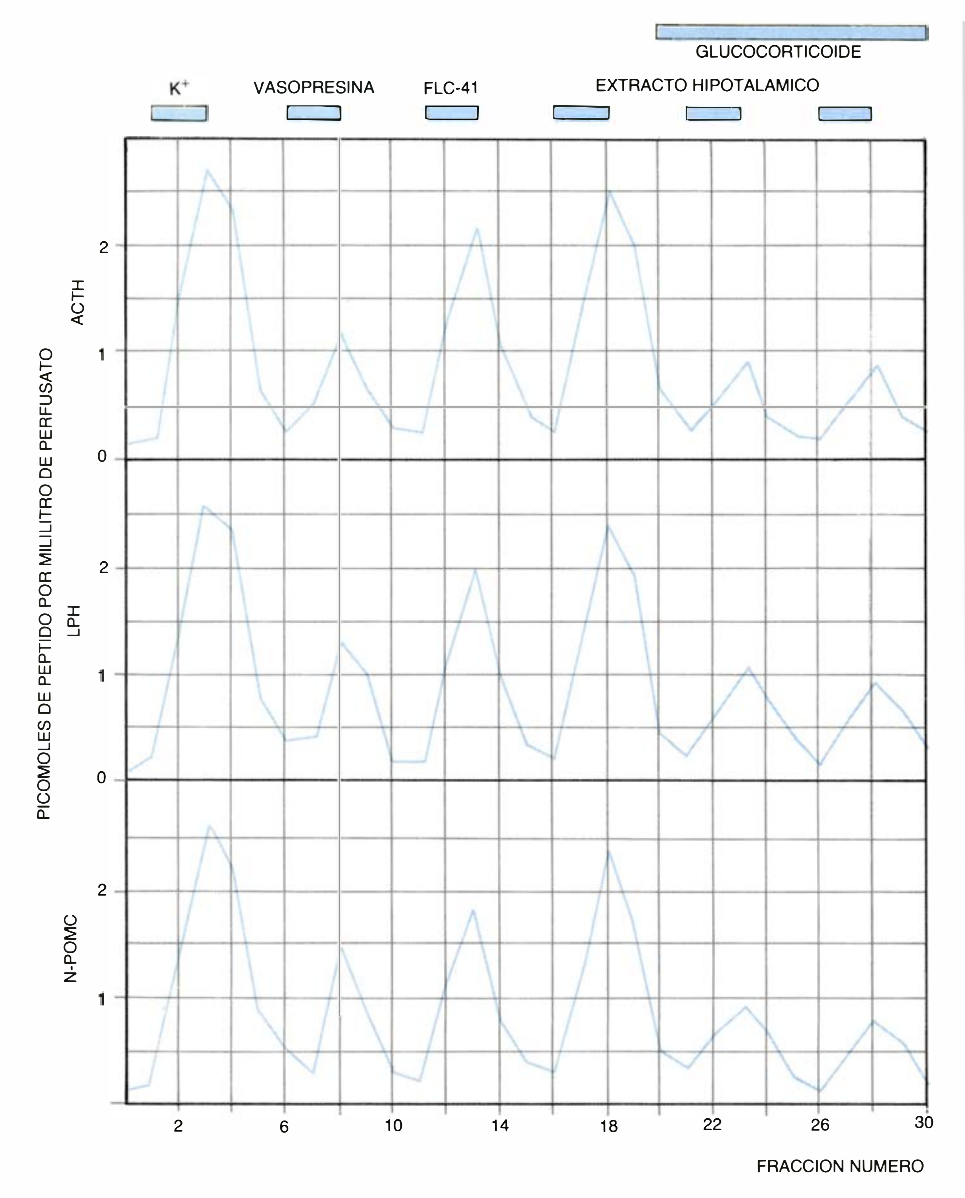


8. FUNCION FISIOLOGICA de los péptidos N-terminales de pro-opiomelanocortina sobre el trofismo suprarrenal. Los ensayos consistieron en inmunizar conejos utilizando N-POMC-48 (*centro*) o ACTH (*derecha*). Comprobada la existencia de grandes cantidades de anticuerpos en el suero de estos animales, se inyectan en crías de rata con una periodicidad constante, mientras que a otro grupo se lo inyecta con un suero de conejo sin ningún tratamiento que sirva de grupo control (*izquierda*). Al cabo de varios días de tratamiento se observa una marcada disminución del crecimiento de las glándulas suprarrenales en las crías del grupo tratado con el suero anti-N-POMC-48, mientras que las tratadas con el suero anti-ACTH no muestran diferencias en el crecimiento de las suprarrenales respecto del grupo control de la corteza.

Tal como era de esperar, las proporciones en que se segregaban los péptidos de diferentes tamaños de un mismo sector (en definitiva, los identificados por cada anticuerpo) eran correlativamente idénticas, cualesquiera fueran los estímulos utilizados. ¿Es posible modular mediante un estímulo crónico la actividad enzimática de manera que se altere la proporción en que se producen y segregan los distintos péptidos? Al menos con uno de ellos la respuesta es negativa: cuando se perfunde continuamente a través de la columna de células un glucocorticoide (cuyo efecto es el de deprimir el nivel de respuesta de las células corticotróficas a los diferentes estímulos agudos), se observa que todos los péptidos se segregan en menor cantidad, si bien la proporción en que se liberan no se altera.

Hemos descrito algunas propiedades hormonales de los péptidos que surgen del procesamiento natural de POMC. También hemos detallado el sincronismo con que se segregan todos en las células corticotróficas de la pars distalis. La pregunta que se impone tras reflexionar sobre estos hallazgos, que debe contestarse para comprender el papel fisiológico de todos estos péptidos en su conjunto, es ¿qué sentido teleológico conlleva liberar a todos ellos en forma simultánea? En otras palabras, ¿los distintos efectos fisiológicos inducidos por cada uno de ellos producen cambios armónicos en un mismo sentido, o algunos de ellos propician efectos antagónicos? La pregunta es muy difícil de responder dada la gran diversidad de efectos atribuidos a los diferentes péptidos.

No obstante, si nos circunscribimos a los efectos de los diferentes péptidos sobre la corteza suprarrenal, podremos esbozar un esquema de acción armónica conjunta de los productos del procesamiento de pro-opiomelanocortina



9. SECRECION DE LOS PEPTIDOS derivados de pro-opiomelanocortina de las células corticotróficas de la pars distalis. Para evaluar la respuesta de las células corticotróficas a los diferentes estímulos, se disgregan las células de algunas glándulas de rata y se las reúne junto con una resina que sirve de soporte, en una columna a la que se perfunde con una solución nutritiva. Los estímulos a ensayar se intercalan en forma de pulsos cortos, y los productos de secreción de las células se recolectan en fracciones, en donde luego se valoran por radioinmunoensayo. En este caso se utilizaron tres sistemas de ensayo que cuantifican los péptidos derivados de los tres sectores principales del precursor, es decir, ACTH, LPH y N-terminal. Los estímulos utilizados consistieron en someter a las células a un efecto despolarizante de las membranas como es la de aumentar la concentración de potasio en el medio de perfusión (*1*), introducir el péptido neurohipofisario vasopresina (*2*), introducir el factor liberador de corticotrofina FLC-41 (*3*) y exponerlas a extractos hipotalámicos (*4*). Cada punto graficado corresponde a la cantidad de cada una de las hormonas detectadas en cada fracción. Los dos últimos estímulos corresponden a extractos hipotalámicos aplicados durante una perfusión continua con un corticoide que deprime los niveles de respuesta de las células corticotróficas. Obsérvese que existen episodios de liberación de los péptidos y que la proporción en que se segregan los tres tipos de péptidos no se altera, cualquiera que sea el estímulo aplicado a las células.

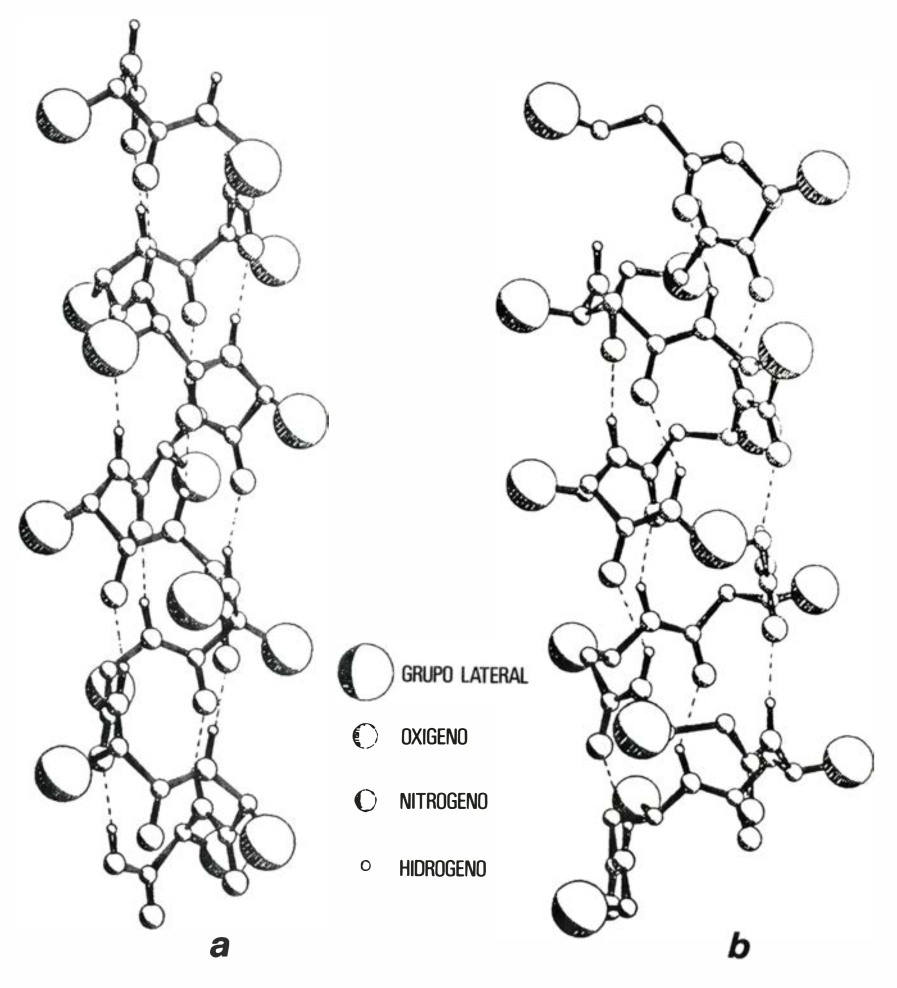
sobre la glándula: (*1*), la ACTH regula la secreción de los glucocorticoides de la zona fasciculada o media de la corteza adrenal. (*2*), El sector correspondiente a lipotrofina o sus fragmentos modularía la secreción de mineralocorticoides, actuando sobre la zona externa o glomerular de las suprarrenales conjuntamente con otros secretagogos como las angiotensinas. (*3*), El sector correspondiente a la porción N-terminal, la gamma-MSH, actuaría potenciando el efecto de ambos tipos de péptidos y probablemente potenciaría la secreción del tercer grupo, los esteroides sexuales, todo ello mediante el mecanismo de activación del paso biosintético común a todos los esteroides. Finalmente (*4*), los péptidos derivados de la porción más extrema N-terminal de POMC actuarían como agentes estimulantes del crecimiento adrenal.

Ciencia y sociedad

Nylons en hélices

La búsqueda de nuevos plásticos capaces de satisfacer crecientes demandas técnicas y económicas se convirtió en una actividad incesante desde la aparición de los primeros polímeros sintéticos a comienzos de siglo. Pero mientras que en las últimas décadas asistíamos al descubrimiento y desarrollo masivo de la mayoría de las familias de plásticos para uso general (poliolefinas, resinas y otros), en estos años los esfuerzos se canalizan hacia la preparación de polímeros especiales según las necesidades concretas de la tecnología actual. No se trata ahora de descubrir nuevas familias, sino de modificar convenientemente las que ya existen.

Entre los numerosos tipos de polímeros que se conocen, los nylons acaparan una parte considerable de la investigación. Estos compuestos se configuran como materiales básicos tanto en la industria textil como en la tecnología mecánica; se dispone ya de alrededor de una docena de ellos capaces de cubrir un amplio rango de prestaciones. Todos se encuadran dentro de un marco único de comportamiento, de modo que sólo diferencias de orden cuantitativo pueden apreciarse entre sus propiedades. Esta situación contrasta con la que se observa en el dominio de las proteínas, que llegan a presentar manifestaciones físicas tan diversas como la de un cabello, la clara de huevo o la pared de un intestino animal. Y esta comparación es del todo pertinente dado que nylons y proteínas están químicamente emparentados dentro de una amplia familia de polímeros que son las poliamidas. Por ello la posibilidad de modificar químicamente la estructura molecular de un nylon para así lograr propiedades distintas de las que tradicionalmente se le atribuyen es un objetivo antiguo, aún por alcanzar. Es ahora cuando, adquirido un conocimiento detallado de las razones moleculares que determinan el comportamiento físico de los polímeros, se está en un punto de partida favorable para descubrir nylons sustitutivos de las proteínas.



Comparación entre la hélice alfa típica de las proteínas (a) *y de la hélice encontrada para el nylon 3 modificado* (b). *Los modelos se han construido a partir de los datos obtenidos por difracción de rayos X de fibras de estos materiales. En ambos casos, las hélices se mantienen estabilizadas por los puentes de hidrógeno, que se alinean a lo largo de las direcciones de sus ejes (líneas punteadas). El empaquetamiento lateral de unas moléculas con otras ocurre mediante fuerzas cohesivas relativamente débiles y genera la estructura tridimensional de las fibras*

Una molécula de poliamida consiste en una larga cadena de grupos amidas –CONH– conectados entre sí mediante un grupo hidrocarbonado cuya configuración varía según la poliamida de que se trate. Entre los átomos de oxígeno e hidrógeno de distintos grupos amidas se establecen puentes de hidrógeno. Estos enlaces actúan en los sólidos como fuerzas cohesivas de alta energía y son los que confieren a las poliamidas propiedades destacadas sobre otros polímeros. El grupo hidrocarbonado es el que, en última instancia, va a decidir la estructura espacial de la cadena y, por consiguiente, el comportamiento que presente cada tipo de poliamida en particular.

En una proteína los grupos amidas están espaciados por un solo átomo de carbono del que generalmente cuelga un grupo químico de naturaleza más o menos compleja; y existen alrededor de unos veinte tipos diferentes. Tres estructuras distintas pueden observarse en las proteínas según las características de este grupo lateral. La denominada beta está constituida por láminas que se apilan unas sobre otras como hojas de un libro. Cada lámina está formada por cadenas proteínicas extendidas en paralelo y enlazadas fuertemente entre sí mediante puentes de hidrógeno. Las proteínas que siguen este modelo de organización suelen poseer grupos laterales pequeños y de escasa variedad. Esta es la estructura de la fibroína, el componente cristalino de la seda natural que imparte a esta fibra sus apreciadas propiedades de rigidez, tenacidad y resistencia.

En segundo lugar, se tiene la hélice alfa, una estructura en que la cadena se enrolla sobre sí misma formando un muelle que se estabiliza por los puentes de hidrógeno que engarzan las espiras contiguas. Esta es la estructura más generalizada entre las proteínas, siendo compatible con cualquier tipo de grupo lateral, aunque sean los más voluminosos los que la inducen preferentemente.

La lana está constituida esencialmente por estructura alfa, la cual se convierte en beta cuando se somete a un estiramiento pronunciado; precisamente el carácter reversible de esta transición permite el alto grado de recuperabilidad típico de las fibras.

La tercera estructura fundamental de las proteínas está representada por el colágeno, una sustancia flexible y tenaz, constituyente básico del tejido conjuntivo animal. En esencia consiste en una triple hélice compuesta por tres cadenas proteínicas de escaso contenido en grupos laterales que se enrollan entre sí y se entrelazan por puentes de hidrógeno.

Los nylons presentan, por contra, una panorámica estructural mucho más sencilla. Los grupos amidas quedan ahora separados por una cadena alifática de metilenos, cuyo número es precisamente lo único que varía de un nylon a otro, siendo este número siempre superior a uno. Un único modelo estructural de cadenas extendidas formando láminas y con características tanto más similares a las de la estructura beta de las proteínas cuanto más corta es la secuencia de metilenos, es el observado por estos polímeros. Sus propiedades físicas son, por tanto, uniformes y más próximas a las de las sedas que a las de los otros tipos de proteínas.

De acuerdo con estas consideraciones, una variación significativa en el comportamiento de los nylons cabría esperarse si determinados grupos químicos se incorporaran a la cadena de la poliamida confiriendo a ésta una arquitectura más próxima a la de las cadenas proteínicas. En esta línea viene trabajando desde hace algunos años un grupo de investigadores de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona en colaboración con el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, con resultados que apoyan estas suposiciones. Las conclusiones más definitivas por el momento son las derivadas de las experiencias llevadas a cabo sobre el nylon 3, una poliamida sintética que no ha llegado a alcanzar realizaciones industriales y cuya estructura y propiedades corresponden a las típicas de su clase. Así se ha podido demostrar que la inserción de un grupo éster como grupo lateral en uno de cada dos de los metilenos del esqueleto del nylon 3 provoca un cambio drástico en su estructura, de modo que una hélice muy similar a la conocida hélice alfa de las proteínas es ahora adoptada por el polímero.

Por primera vez se pone de manifiesto que una poliamida sintética puede presentar estructura de proteína, y es de esperar que ello tenga repercusiones prácticas importantes. En primer lugar, un comportamiento de fibra con los rasgos propios de las alfa proteínas, incluyendo transiciones estructurales similares, es razonablemente previsible. Por otra parte, la posible biodegradabilidad de estas sustancias se sumaría a la excelente biocompatibilidad de que hacen gala las poliamidas en general para dar materiales de aplicaciones especiales en el campo de la ingeniería biomédica. Finalmente, es de esperar que propiedades físicas intrínsecamente ligadas a la naturaleza helicoidal de las moléculas sean observables en estos nylons. Así, el carácter piezoeléctrico y la capacidad de formar cristales líquidos son sin duda aspectos interesantes a considerar, sobre todo si se tiene en cuenta la escasa frecuencia con que estas propiedades se prodigan entre los materiales poliméricos.

Es evidente que estas potenciales aplicaciones han de ser urgentemente evaluadas y de los resultados que se obtengan dependerá el futuro comercial de estos nuevos nylons. Por ello, hay una segunda fase de estas investigaciones en curso con el objeto de fabricar cantidades suficientes de material que permitan llevar a cabo los ensayos necesarios. En cualquier caso, no se ha de olvidar que estos polímeros no son más que las primeras muestras de una nueva serie de poliamidas que habrá de ser explorada con más detalle para poder llegar a establecer conclusiones definitivas sobre sus reales posibilidades de aplicación. (Sebastián Muñoz-Guerra y José María Fernández Santín.)

Climatología del cuaternario

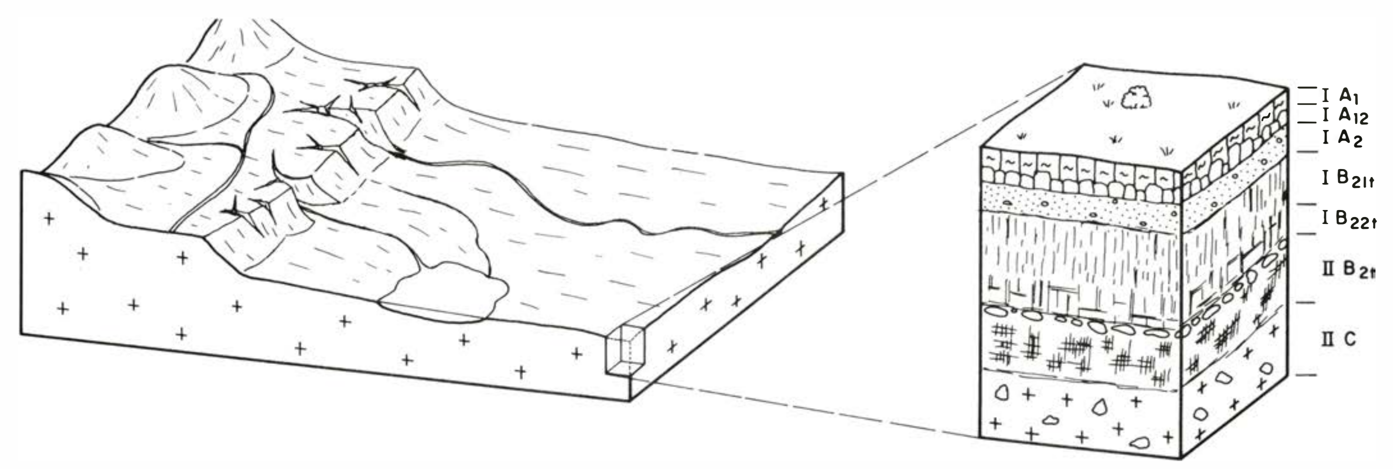
Aunque se dispone ya de numerosos datos paleoclimáticos, hacen falta trabajos de síntesis que permitan establecer las secuencias climáticas en áreas continentales durante el pleistoceno y holoceno (últimos dos millones de años), períodos históricos incluidos. Por este motivo, la Universidad Autónoma de Madrid ha convocado un simposio internacional sobre este tema a celebrar en junio de 1986.

El clima es uno de los principales factores ambientales cuya influencia sobre los organismos y en especial sobre el hombre constatamos a diario. Pero, ¿cuál es la permanencia de estas condiciones climáticas? A escala de tiempo de nuestra vida, tenemos clara conciencia de la variabilidad del clima, observamos cómo unos inviernos son más rigurosos o húmedos que otros, variabilidad que nos sirve incluso para caracterizar el tipo de clima.

Hacia principios del siglo XVIII aparecen explicaciones sistemáticas sobre lo que hoy sabemos son depósitos y caracteres glaciares y que observamos en zonas templadas y aún cálidas. Abandonadas las teorías procedentes de una incorrecta interpretación del libro del Génesis, a comienzos del siglo XIX estuvo en boga la teoría glaciar, que establecía las zonas de Europa que habían estado cubiertas por el hielo en épocas pasadas. Un ingeniero suizo, J. Venetz, sometió en 1821 un artículo a la Sociedad Helvética, en el que argumentaba que los glaciares alpinos se habían expandido alguna vez en gran escala. Desde 1600 hasta mediados del siglo XVIII, se había constatado ya una expansión moderada pero persistente de estos glaciares en muchas localidades, como en el valle de Chamonix, donde quedó sepultada por un glaciar una mina de plata que se había trabajado durante la Edad Media. Y la villa de St. Jean de Perthuis cayó sepultada también por el glaciar Brenva alrededor de 1600. Con otros muchos datos procedentes de Escandinavia, Islandia y Reino Unido, veníase a afirmar, pues, que el clima había sido más moderado durante la Edad Media. Esta pequeña expansión de los hielos desde el siglo XVII hasta mitad del XIX se conoce en la actualidad como "pequeña edad glaciar". Pero la gran glaciación propuesta por Venetz no fue aceptada de inmediato en su época.

Jean de Charpentier volvió a defender en 1834, ante la misma Sociedad Helvética, la teoría de la gran glaciación, sin que lograse modificar el fiel de la balanza a favor de los más numerosos opositores a la nueva teoría. Uno de ellos, el zoólogo Jean Louis Rodolphe Agassiz, sería precisamente el que tras su conversión a las nuevas ideas lograse entre 1836 y 1846 su aceptación universal. Pero aún antes de la total aceptación de la teoría glaciar, en la que se hablaba de una sola gran edad de hielo, algunos investigadores habían concluido que éste había avanzado y retrocedido no sólo una, sino varias veces en la historia geológica reciente. A principios del siglo XX quedaban establecidos los cuatro grandes avances glaciares durante el cuaternario antiguo **(pleistoceno), desde 1.800.000 años hasta 10.000 años antes de la actualidad.**

Pero estas glaciaciones no fueron las únicas. Se han reconocido siete grandes glaciaciones desde la de Gowganda hasta la cenozoica. Se ha recurrido a la distribución geográfica de las indicaciones de estas glaciaciones para corroborar la teoría de la movilidad de las pla-



1. El ejemplo corresponde a un suelo muy antiguo por su morfología, dado que existen horizontes B_t de enriquecimiento, junto a otros de empobrecimiento de tipo A_2; también se observan horizontes orgánicos, A_{11} y A_{12}, procedentes del resto vegetal y de origen reciente, así como un horizonte C de alteración creado en el momento de inicio del suelo. A través del estudio del perfil, relacionado con las condiciones ecológicas, podemos establecer algunas consideraciones paleoclimáticas. Aun cuando los métodos aplicados a la evaluación del tiempo de formación de suelos resulta difícil de establecer, la existencia de horizontes B_t, de enriquecimiento en arcilla, conlleva un período evolutivo largo y probablemente una vegetación densa. La discontinuidad entre los horizontes IB_{2t} y IIB_{2t} denota un cambio en las condiciones ambientales producidas probablemente por una variación climática. La existencia de horizontes B_t en relación al A_2 sugiere que el proceso de formación de dichos horizontes B_t está relacionado en este caso con una movilización de arcilla, para cuya realización se necesita un período de tiempo prolongado. La existencia de horizontes B_t sugieren un regimen climático templado-húmedo

cas litosféricas, conocida como tectónica de placas o tectónica global.

De todos los períodos geológicos, el cuaternario queda mejor definido y diferenciado, justamente en virtud de las oscilaciones climáticas; se ha propuesto incluso que el problemático límite entre el plioceno (período terciario) y el pleistoceno se dilucidara en razón de criterios climáticos y no de criterios geológicos y faunísticos que sirven para identificar los demás períodos en que se divide la historia de la Tierra.

En estos últimos años ha cobrado intenso auge el fenómeno de las oscilaciones climáticas. El detonante de ese renovado interés hay que buscarlo en la serie de sequías que han asolado el Sahel (1968-73), Reino Unido y Centro Europa (1975-76), España (1979-84), Etiopía, Suráfrica, Australia y un largo etcétera, junto con bruscos descensos de temperatura o prolongados períodos de lluvias en otros lugares de nuestro planeta, fenómenos todos ellos que se han dado en llamar "crisis climáticas". ¿Pero hasta qué punto estas crisis de unos pocos años de duración representan puntos singulares en las oscilaciones climáticas? ¿Cómo distinguir una crisis de unos pocos años o lustros de una oscilación climática que dura siglos o milenios? ¿A qué son debidas estas crisis climáticas? ¿Se pueden prever?

Conjeturar el clima de un futuro inmediato o próximo, más allá de la previsión meteorológica, reviste especial interés por afectar a gran número de actividades humanas; importa al economista, al planificador de recursos hídricos y a los responsables sanitarios, entre otros, tan vulnerable se ha vuelto nuestra civilización a las variaciones climáticas. Las semillas de cereales de alta productividad son muy sensibles a los cambios de humedad. Las grandes concentraciones urbanas e industriales dependen de complejos sistemas de abastecimiento de agua y de grandes volúmenes de la misma. Mediante la difusión de sistemas de calefacción y re-

REGISTRO PALEOCLIMATICO

CONTINENTAL

- Glaciares (10^2 - 10^6 años)
- Depósitos glaciares y características erosivas glaciares (10^2 - 10^6 años)
- Características periglaciares (10^2 - 10^6 años)
- Oscilaciones de línea de costa, glacioeustáticas (10^3 - 10^5 años)
- Depósitos eólicos (loess y arena de duna) (10^2 - 2×10^6 años)
- Sedimentos y líneas de costa lacustres (10^2 - 10^6 años)
- Aguas subterráneas (10^2 - 4×10^4 años)
- Paleosuelos (10^3 - 2×10^6 años)
- Espeleotemas (10^2 - 2×10^6 años)
- Anillos de crecimiento de árboles (10^2 - 6×10^3 años)
- Polen (10^2 - 12×10^3 años)
- Macrofósiles de plantas (5×10^2 - 8×10^3 años)
- Distribución residual moderna de plantas y animales (10^3 - 10^6 años)

MARINO

- Sedimentos orgánicos (fósiles planctónicos y bentónicos) (10^2 a 2×10^6 años)
- Sedimentos inorgánicos (composición mineralógica, velocidad de acumulación, geoquímica) (10^2 a 2×10^6 años)

HISTORICO

- Notas escritas sobre indicadores ambientales (10^2 - 4×10^3 años)
- Registros fenológicos (10^2 - 4×10^3 años)
- Registros arqueológicos (10^2 - 6×10^3 años)

2. La paleoclimatología es el estudio del clima anterior al período de medidas instrumentales. En el cuadro se trata de sintetizar las principales fuentes de datos para la reconstrucción paleoclimática durante el cuaternario y la amplitud temporal aproximada del registro. Las flechas indican relaciones entre distintas fuentes de datos. Las técnicas de estudio que se aplican a estos materiales son muy diversas: glaciológicas, geológicas, isotópicas, geoquímicas, biológicas, etcétera

frigeración, nos hemos liberado en cierta medida de los cambios estacionales, pero basta un invierno riguroso para que la subida de la factura de energía nos aboque a la crisis, esta vez económica.

Para conocer algo más sobre el comportamiento del clima, debemos estudiarlo a lo largo de series de tiempo lo más prolongadas posible, y aquí topamos con las limitaciones del registro meteorológico que, para nuestra península, supera poco más del centenar de años en las estaciones de Gibraltar, San Fernando (Cádiz), Lisboa o Madrid (Retiro). Es pues necesario hacer uso de todos los recursos que nos brindan la geología, fitogreografía, historia, arqueología, etcétera, para establecer o reconstruir una secuencia suficientemente larga de variaciones climáticas.

El clima del pasado, por sí mismo, interesa a numerosas ciencias, en su doble relación de resultado y proceso, en cuanto de éste puede inferirse el tipo de clima actuante. El clima determina, a su vez, ciertos procesos. Así, el geomorfólogo, estudiando las formas del paisaje, puede deducir las condiciones climáticas bajo las cuales se ha producido dicho entorno. El historiador puede interpretar ciertos fenómenos sociales en relación con crisis climáticas, el edafólogo la génesis de un suelo y el prehistoriador las condiciones del hábitat.

Para compensar la brevedad del registro meteorológico instrumental, han de buscarse datos en el registro impreso en los distintos subsistemas climáticos. La escala de tiempo y longitud del registro es muy variable de un subsistema a otro. Así, los anillos de crecimiento del tronco de un árbol nos ofrecen una secuencia de varios centenares de años; el casquete de hielo de Groenlandia, varios miles de años; un paisaje, las condiciones climáticas de varios cientos de miles de años.

A partir de los registros obtenidos de los sondeos en el fondo de los océanos, se han establecido los principales cambios climáticos acaecidos durante el cuaternario, al menos a escala hemisférica. Sin embargo, los continentes producen una fuerte distorsión en las formas suavizadas de los límites climáticos obtenidos de indicaciones marinas. De tal forma que la zonación climática en áreas continentales es el principal reto que tienen los paleoclimatólogos en la actualidad. Por otra parte, cada región de la tierra tiene sus características climáticas propias y no son directamente extrapolables unas a otras. (Fernando López Vera y Raimundo Jiménez Ballesta.)

Cúmulos globulares

Densas agregaciones de estrellas antiguas, cuya propia gravitación liga unas a otras. Su estudio ha arrojado provechosa luz sobre la evolución de las estrellas, las galaxias y el universo entero

Ivan R. King

Para quien observe a través de un gran telescopio, los cúmulos globulares se numeran entre los objetos más bellos del cielo. Las estrellas llenan el campo de visión por millares; hasta un millón de ellas, la mayor parte demasiado débiles para dejarse ver, pueden quedar encerradas en un volumen esférico cuyo diámetro no llega a los 150 años-luz. Durante decenios, los astrónomos han venido reflexionando sobre la manera en que tales acumulaciones de estrellas pudieron formarse y sobre el modo en que la interacción entre sus campos gravitatorios las mantiene unidas en un cúmulo estable.

Además, a lo largo del siglo xx, el estudio de los cúmulos globulares ha conducido a avances fundamentales en muchas ramas de la astronomía. Debido en parte a su luminosidad, la distribución espacial de los mismos ha ayudado a establecer fronteras que dividen la Vía Láctea de otras galaxias; se ha sugerido incluso que las nubes de gas que engendraron los cúmulos globulares constituyeron el material de construcción de las galaxias. Más aún, se puede suponer que todas las estrellas que integran un mismo cúmulo son de la misma edad; de donde los tipos de estrellas que hay en los cúmulos ofrecen una visión general sobre las vías de evolución de las estrellas y sobre la razón por la que difieren en color y brillo. Finalmente, los cúmulos globulares están relacionados con la evolución del propio universo. Son los objetos más antiguos conocidos, datando, tal vez, de los instantes consecutivos a la gran explosión; en consecuencia, sus edades imponen fuertes restricciones experimentales sobre los modelos cosmológicos y su composición química revela la composición de las galaxias en su primera fase de evolución.

En una época en la que cada uno de esos temas –estructura galáctica, evolución y clasificación estelar y cosmología– se ha convertido en objeto de disciplinas casi independientes, el estudio de los cúmulos aporta todavía, además de su interés intrínseco, el sentido de la unidad subyacente a todo el dominio de la astronomía. Si los investigadores pudieran responder a cuantas preguntas les plantean los cúmulos, sabrían mucho más de la naturaleza del universo.

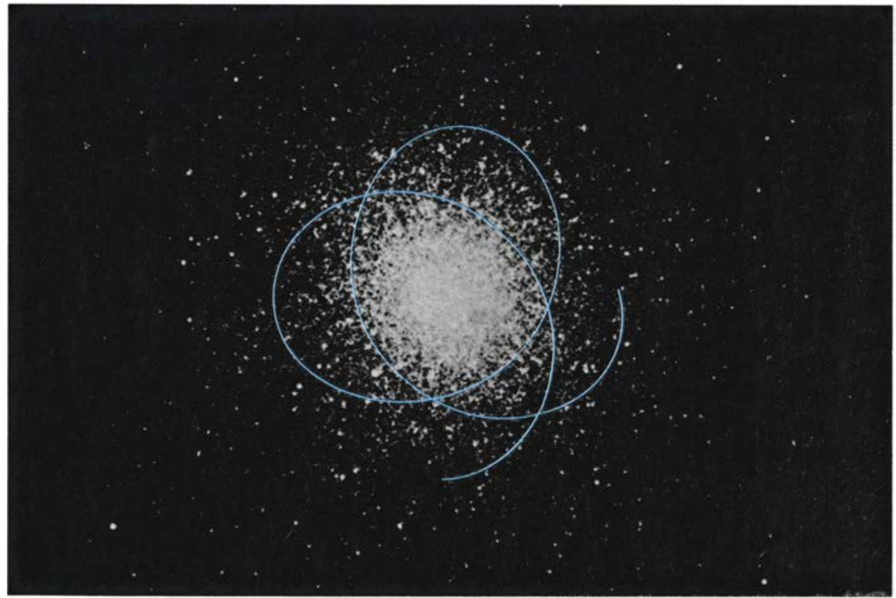
Estructura galáctica

En los años en torno al cambio de siglo creíase que nuestro sistema estelar estaba constituido por un disco cuyo diámetro se extendía un par de miles de parsecs, centrado en el Sol. (Un parsec son 3,26 años-luz.) Esta concepción heliocéntrica quedó en grave entredicho en 1918, cuando Harlow Shapley, sirviéndose de los telescopios del Observatorio de Monte Wilson, midió la distancia hasta un puñado de decenas de cúmulos globulares. Descubrió que constituían un sistema extenso, centrado más allá de las más brillantes nubes de estrellas de la Vía Láctea, en la constelación de Sagitario, donde menudeaban los cúmulos. Shapley formuló lo que después él mismo describió como "una hipótesis atrevida y prematura": que los cúmulos globulares formaban una especie de "esqueleto" cuyo centroide se hallaba en el centro del sistema estelar total. El Sol, según su argumentación, se encontraba alejado del centro, hacia un borde del disco.

Lo que Shapley había descubierto era la galaxia de la Vía Láctea. El sistema galáctico definido por la distribución espacial de los cúmulos globulares era mucho mayor que el aparente "sistema local", del que después se demostró que constituía una ilusión causada por la lobreguez del espacio. El polvo interestelar absorbe la luz de las estrellas, haciéndolas aparecer más lejanas de lo que realmente están. Cuando se desprecia la absorción interestelar, se sobreestiman las distancias astronómicas; la magnitud del error aumenta con la distancia real del objeto. Resultado de ello, las estrellas más débiles y lejanas parecen distribuidas en el espacio de una manera mucho más dispersa que las estrellas brillantes y próximas, produciendo la impresión de una sistemática disminución de la densidad estelar con la distancia, en todas las direcciones a partir de la Tierra. Esta ilusión alimentó la concepción heliocéntrica.

Ironía de las cosas, Shapley no consideró la absorción interestelar, pero tuvo la buena suerte de estar observando cúmulos situados fuera de la capa de polvo absorbente, confinada en su mayor parte en el disco, delgado y aplanado, de la galaxia. Sin embargo, el haber despreciado la absorción le condujo a sobreestimar grandemente las distancias de los cúmulos y, con ello, el tamaño del disco galáctico, al que asignó un radio de 50.000 parsecs. Sólo se corrigió el error en 1930, cuando Robert J. Trumpler, del Observatorio Lick, mostró que la absorción interestelar era un fenómeno general. Hoy el radio del disco galáctico se sitúa en 15.000 parsecs.

La "prematura hipótesis" de Shapley, según la cual el centroide de la distribución de cúmulos globulares definía el centro de la galaxia, se acepta hoy como un hecho. Una intensa fuente de radioemisiones sita en Sagitario marca la dirección hacia el centro, pero el valor exacto de la distancia hasta el Sol se ha mostrado escurridizo. El método básico de Shapley de considerar las posiciones de los cúmulos globulares se ha aplicado repetidamente. Una exploración muy completa, realizada, en 1976, por William E. Harris, de la Universidad McMaster, en Ontario, arrojó un valor de 8500 parsecs. Sin embargo, más recientemente, Carlos Frenk, de la Universidad de Sussex, y Simon D. White, de la de Arizona, han sostenido que las distancias hasta los



1. MESSIER 13, en la constelación de Hércules. Nos hallamos ante el cúmulo globular más brillante del cielo septentrional; al anochecer, en verano, está encima mismo de nuestra cabeza y se le distingue a simple vista. Alberga unas 500.000 estrellas; en su centro la densidad estelar multiplica unas 20.000 veces la de la vecindad del Sol. En la imagen en falso color de la región central (*arriba*) los colores más brillantes representan las regiones con emisión más intensa. La imagen se tomó con un dispositivo acoplado en carga (DAC, un detector luminoso electrónico con base de silicio) adaptado al telescopio de 5 metros de Monte Palomar. Como un DAC puede registrar un intervalo de brillos mucho mayor que la placa fotográfica, puede resolverse parte del detalle del denso núcleo de M13. La región cubierta por la fotografía (*abajo*) tiene una anchura de 15 minutos de arco, unas tres veces más que la imagen del DAC. Las estrellas describen órbitas alrededor del centro del cúmulo con un período que es del orden del millón de años. La órbita de una estrella (*línea azul*) descansa casi en un plano, pero no retorna a su posición original.

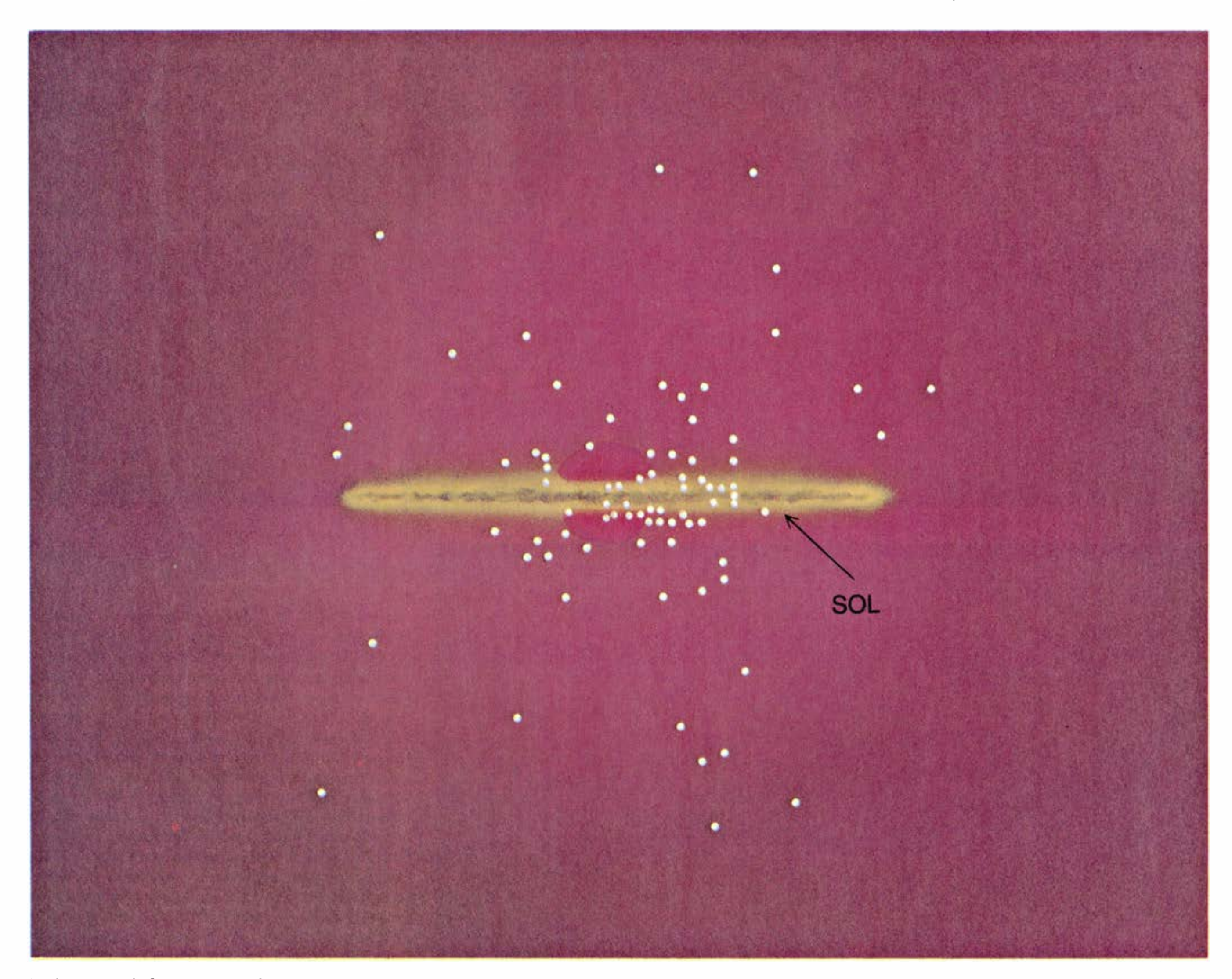
cúmulos globulares continúan sobrestimándose y que el centro de la galaxia sólo dista 6800 parsecs. La cifra correcta está probablemente comprendida entre ambos valores. Aunque se han empleado otros métodos para hallar el centro, con resultados similares, los cúmulos globulares parecen seguir ofreciendo, no obstante, la mayor esperanza de resolver la cuestión.

El "esqueleto" de cúmulos globulares constituye también una buena guía del contorno de la Vía Láctea. Por la sencilla razón de que está ligada al contenido estelar distintivo de los cúmulos, que Shapley descubrió cuando medía el color y magnitud de las estrellas individuales de los cúmulos. Observó que la distribución de las estrellas en un diagrama de Hertzsprung-Russell (cuyo eje vertical representa la magnitud, o luminosidad, y el eje horizontal el color) difiere por entero de la que ofrecen las estrellas ordinarias de la vecindad solar. Las estrellas vecinas más brillantes son azules, mientras que en los cúmulos son rojas.

Poblaciones de esfrellas

Nadie prestó especial atención a esta curiosidad hasta 1944, cuando Walter Baade, del Monte Wilson, observó que las estrellas más brillantes de las regiones centrales de la galaxia de Andrómeda eran también gigantes rojas. En virtud de ello propuso, en un alarde de imaginación, que todas las estrellas se dividían en dos "poblaciones" fundamentalmente diferentes. La población I estaría constituida por las estrellas de la vecindad solar y, en general, por las estrellas que se hallaran en los discos de la Vía Láctea y de otras galaxias. Las estrellas de la población II estarían dispersas sobre un "halo" casi esférico que rodea el disco, aunque, como en las estrellas del disco, su concentración sería mayor hacia el centro de la galaxia. Los cúmulos globulares vendrían a ser agregaciones, luminosas y fácilmente observables, de estrellas del halo. Su distribución no sólo indicaba el camino hacia el centro galáctico, sino que delimitaba también la extensión del halo. Se admite hoy que el halo de la Vía Láctea puede extenderse hasta 100.000 parsecs desde el centro.

Cuando Baade ideó el modelo de las poblaciones estelares, carecía de fundamentación física que avalara las diferencias observadas en sus distribuciones magnitud-color. Comenzó a aclararse después de la segunda guerra mundial, a medida que las técnicas de fotometría fotoeléctrica se generalizaron entre los usos científicos. Los estudios fotoeléctricos de los cúmulos de estrellas produjeron diagramas color-magnitud mucho más afinados. El diagrama de Hertzsprung-Russell de un cúmulo, cuyas estrellas se formaron



2. CUMULOS GLOBULARES de la Vía Láctea. Ayudan a entender la estructura de la galaxia. Se conocen unos 125 (*puntos blancos*); aquí se muestran aquellos cuyas posiciones se saben. El polvo impide la visión de muchos más, situados en el lado opuesto, respecto al Sol, del plano galáctico. La distribución de cúmulos define el centro de la galaxia. Los globulares son agregaciones de estrellas de la población II: estrellas que pertenecen al halo galáctico (*rojo*), que se cree surgió al colapsar la nube de gas protogaláctica. Las jóvenes estrellas del disco de brazos espirales (*amarillo*), donde hay gas todavía y continúa la formación de estrellas, pertenecen a la población I. El radio del disco mide 15.000 parsecs; el halo se puede extender hasta 100.000.

presumiblemente todas hacia el mismo tiempo y lugar, muestra, en efecto, el rastro de la evolución estelar: las estrellas se distribuyen hacia la parte superior del diagrama porque las más brillantes y macizas se desarrollan antes. La mayor parte de la vida de una estrella se consume en la "secuencia principal" del diagrama, tiempo durante el cual radia energía fundiendo hidrógeno para formar helio en su núcleo. Cuando la provisión de hidrógeno nuclear se ha agotado, la estrella se separa de la secuencia principal, continúa quemando hidrógeno en una capa delgada alrededor del núcleo y se transforma en una gigante roja.

La posición del punto de separación constituye un índice de la edad del cúmulo: las estrellas más brillantes se separan primero y, a medida que la edad del cúmulo aumenta, el punto de separación se mueve hacia la parte inferior de la secuencia principal, hacia las regiones de menor luminosidad. A principios de los años cincuenta, varios investigadores estimaron la edad de cúmulos globulares y de cúmulos "abiertos", que son agregaciones, mucho menos densas, de estrellas de la población I del disco galáctico. Tales estudios revelaron la primera diferencia física entre las dos poblaciones. Los distintos cúmulos abiertos abarcaban una gama definida de edades, mientras que todos los cúmulos globulares se remontaban muy atrás en el tiempo; de hecho, parecían ser los objetos más antiguos del universo.

Investigaciones ulteriores mostraron que la edad no es la única peculiaridad de las estrellas de la población II: difieren también por su composición química. A mediados de los años cincuenta, Joseph W. Chamberlain, por aquel entonces en la Universidad de Chicago, y Lawrence Aller, en la de Michigan, observaron que ciertas líneas de absorción oscuras en el espectro de las estrellas del halo son más débiles que las líneas comparables de las estrellas de la población I. Las líneas más débiles indican menor abundancia, en la población del halo, de los elementos químicos que absorben la radiación a esas frecuencias.

Los elementos en cuestión resultaron ser los elementos "pesados": todos salvo el hidrógeno y helio. Al calcular las primeras vías de evolución para los cúmulos globulares, Fred Hoyle, entonces en la Universidad de Cambridge, y Martin Schwarzschild, de la Universidad de Princeton, vieron que los caminos de las gigantes rojas observadas sólo se justificaban si se aceptaba una mengua de elementos pesados. En la taquigrafía astronómica, tales elementos se designan por "metales", aun cuando predominen el carbono, oxígeno y nitrógeno. De aquí que los cúmulos globulares, además de antiguos, se identificaran como "pobres en metales".

La mayoría de los astrónomos participan hoy de la opinión según la cual los cúmulos globulares y las estrellas del halo en general serían pobres en metales, y se apoyan en la antigüedad de los mismos. Se suele admitir que la gran explosión con la que comenzó el universo creó sólo hidrógeno y helio. Se supone también que los núcleos pesados se sintetizaron tiempo después en el interior de las estrellas (donde la temperatura y presión reinantes eran suficientemente elevadas) y fueron arrojados luego al espacio en explosiones de supernova; los elementos más pesados pudieron aparecer durante las propias explosiones. De acuerdo con este punto de vista, los cúmulos globulares y las estrellas de halo se formaron al principio, cuando no abundaban los elementos pesados en el universo entero. Las nubes gaseosas protogalácticas se condensaron después, para formar los discos de la Vía Láctea y otras galaxias similares. Hacia esa época, la nucleosíntesis en las estrellas moribundas de la población del halo había elevado la abundancia de elementos pesados en el gas a su nivel actual. El halo de la Vía Láctea constituye, probablemente, un buen indicador del tamaño original de nuestra galaxia en la época en que las estrellas empezaron a nacer; la formación de estrellas se limita actualmente a las nubes de gas del delgado disco.

Poblaciones complejas

La anterior explicación de las diferencias de la población estelar, de atractiva sencillez, choca con la nuda verdad, algo más confusa. No todos los cúmulos globulares son iguales. Para empezar, aun cuando todos se caracterizan por su pobreza en metales, la abundancia específica de elementos pesados varía de uno a otro. Esto lo observó ya, hace casi 30 años, William W. Morgan, del Observatorio de Yerkes, quien notó diferencias entre las intensidades de las líneas espectrales de distintos cúmulos. Desde entonces, los investigadores han hecho estimaciones cuantitativas de las abundancias de elementos pesados analizando detenidamente los espectros de las estrellas, una por una. Tales análisis han mostrado que la concentración de metales en estrellas de cúmulos globulares varía desde una doscientosava parte de los niveles observados en el Sol (típica estrella de la población I) hasta sólo algo menos que los valores solares. El límite superior preciso resta todavía incierto, por la misma debilidad connatural a los espectros de estrellas, tomadas una a una.

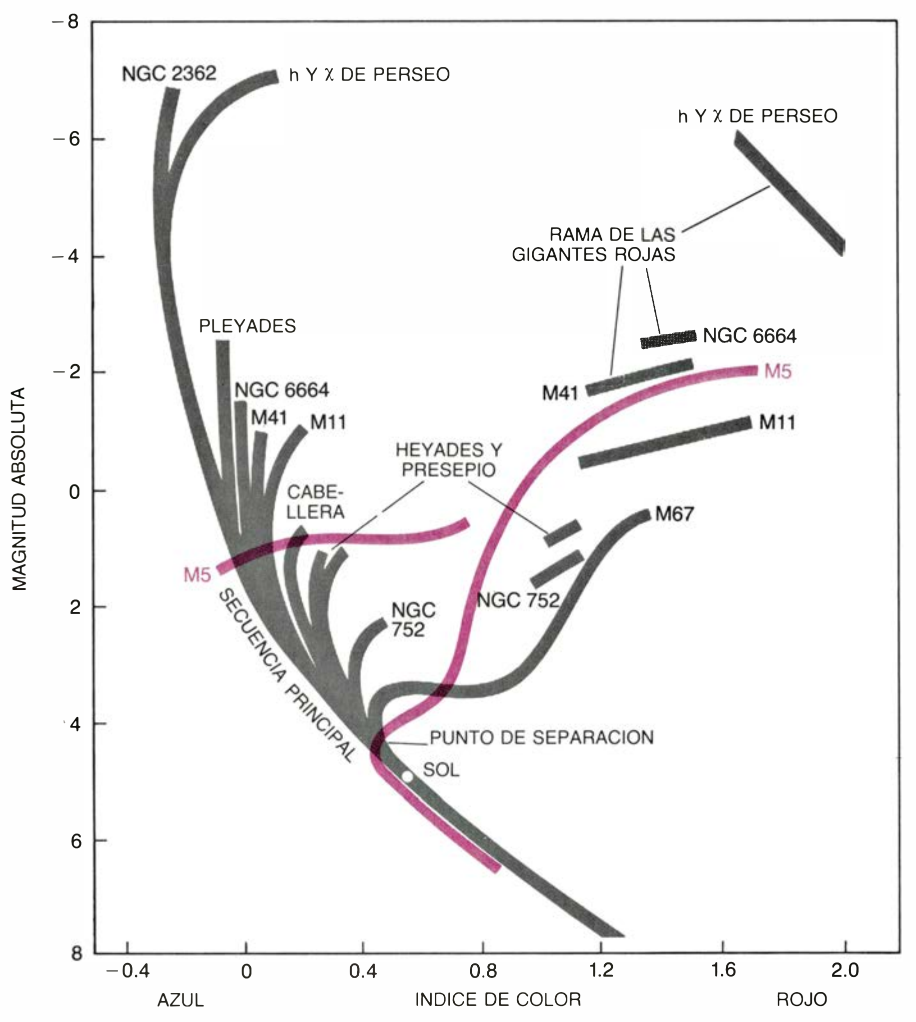
Ciertas estrellas asignadas en un principio a la pobación del halo parecen tener incluso proporciones de metales equivalentes a las del Sol. Las estrellas RR de Lira son variables (es decir, su brillo varía periódicamente), corrientes en los cúmulos globulares y en todo el halo de la Vía Láctea; algunas tienen líneas espectrales de los elementos pesados tan intensas como las solares. Si no hubiera una solución de continuidad en las concentraciones de metales en las estrellas de halo, que se extendiera hasta los mismos niveles característicos de las estrellas de disco, se borraría esa nítida distinción entre las dos poblaciones. Pero hay dos circunstancias que sugieren que las estrellas RR de Lira, de líneas intensas, no deben inscribirse entre las de halo. En primer lugar, nunca se ha encontrado una estrella RR de Lira de líneas intensas en un cúmulo globular. En segundo lugar, sus órbitas alrededor del centro galáctico están más cercanas a las de las estrellas de disco que a las propias de las estrellas de halo. Pese a su notable semejanza visual con sus hermanas de los cúmulos globulares, las estrellas RR de Lira de líneas intensas pueden pertenecer a otra clase estelar, quizás incluso a una población intermedia entre las estrellas de disco (I) y las de halo (II).

En todo caso, es claro que los cúmulos globulares presentan una gama de abundancias de metales; ¿podría indicar ello un intervalo de edades? Aunque parece muy probable que los cúmulos globulares de la Vía Láctea sean todos anteriores a las estrellas de disco, más numerosas, no está del todo claro hasta cuándo se remonta su antigüedad, ni si el período de su formación abarcó una fracción apreciable de la primitiva historia de la galaxia. El método para estimar la edad de un cúmulo ha permanecido inalterado desde que se ideó en los años cincuenta: se busca la edad que, junto con un modelo teórico de la evolución estelar, reproduce mejor la distribución observada de estrellas del cúmulo en un diagrama color-magnitud, especialmente en el punto de separación. Don A. VandenBerg, de la Universidad de Victoria, en Columbia Británica, acaba de calcular un impresionante conjunto de curvas de evolución para varios cúmulos glo-

bulares. Ha llegado a la conclusión según la cual los cúmulos tienen una edad aproximada de 16.000 millones de años, pero incluso esos cálculos se mueven en un margen de error de unos 3000 millones de años.

Algunos astrónomos sostienen que, cualquiera que sea la edad de los cúmulos globulares de la Vía Láctea, todos poseerán la misma edad, porque la disipación de energía en la nube de gas formadora de estrellas habría impedido que mantuviera la estructura esférica del halo durante un largo período. De acuerdo con ese razonamiento, la nube en rotación se habría condensado rápidamente formando el delgado disco y dejando tras de sí los cúmulos globulares v las otras estrellas del halo. La gama de abundancia de metales podría atribuirse al hecho de que los distintos cúmulos globulares se formaran en diferentes regiones locales del gas, cuya composición química no era uniforme.

Hay indicios, sin embargo, de que los cúmulos globulares difieren entre sí en aspectos distintos de la abundancia de metales pesados: los cúmulos con la misma abundancia de metales presentan, frecuentemente, diagramas de Hertzsprung-Russell dispares. Por ejemplo, la "rama horizontal" que sigue a la fase de gigante roja en la secuencia de evolución puede contener estrellas azules, estrellas rojas o ambas. Debe haber una segunda variable que dé cuenta de esas diferencias, y algunos investigadores la asignan a la edad. Las diferencias podrían explicarse también por una variación del contenido de helio entre los cúmulos, por las proporciones detalladas de los distintos elementos pesados o por la velocidad a la cual las estrellas giran en torno a sus ejes. La naturaleza de la segunda variable se halla envuelta todavía en el misterio.



3. DIAGRAMAS DE HERTZSPRUNG-RUSSELL: muestran la distribución de estrellas en los cúmulos de acuerdo con su color y magnitud; proporcionan la primera prueba de la existencia de dos poblaciones estelares diferentes. La composición superior pone los diagramas de H-R de los cúmulos abiertos (*gris*) del disco galáctico en contraste con el diagrama del cúmulo globular M5 (*en color*), que pertenece al halo. En un mismo cúmulo, las estrellas integrantes son de la misma edad, de suerte que el diagrama H-R refleja el camino de la evolución estelar. Las estrellas brillantes y de gran masa (las que tienen magnitudes negativas) evolucionan más rápidamente; son las primeras en agotar el hidrógeno de su núcleo, separarse de la secuencia principal y convertirse en gigantes rojas. A medida que el cúmulo envejece, el punto de separación desciende en la escala de magnitud. Los núcleos abiertos (población I) varían en edad. Uno de los más jóvenes, NGC 2362, se formó hace aproximadamente un millón de años. Se cree que los cúmulos globulares (población II), incluido el M5, se formaron hace unos 13.000 millones de años, por lo menos.

Cosmología

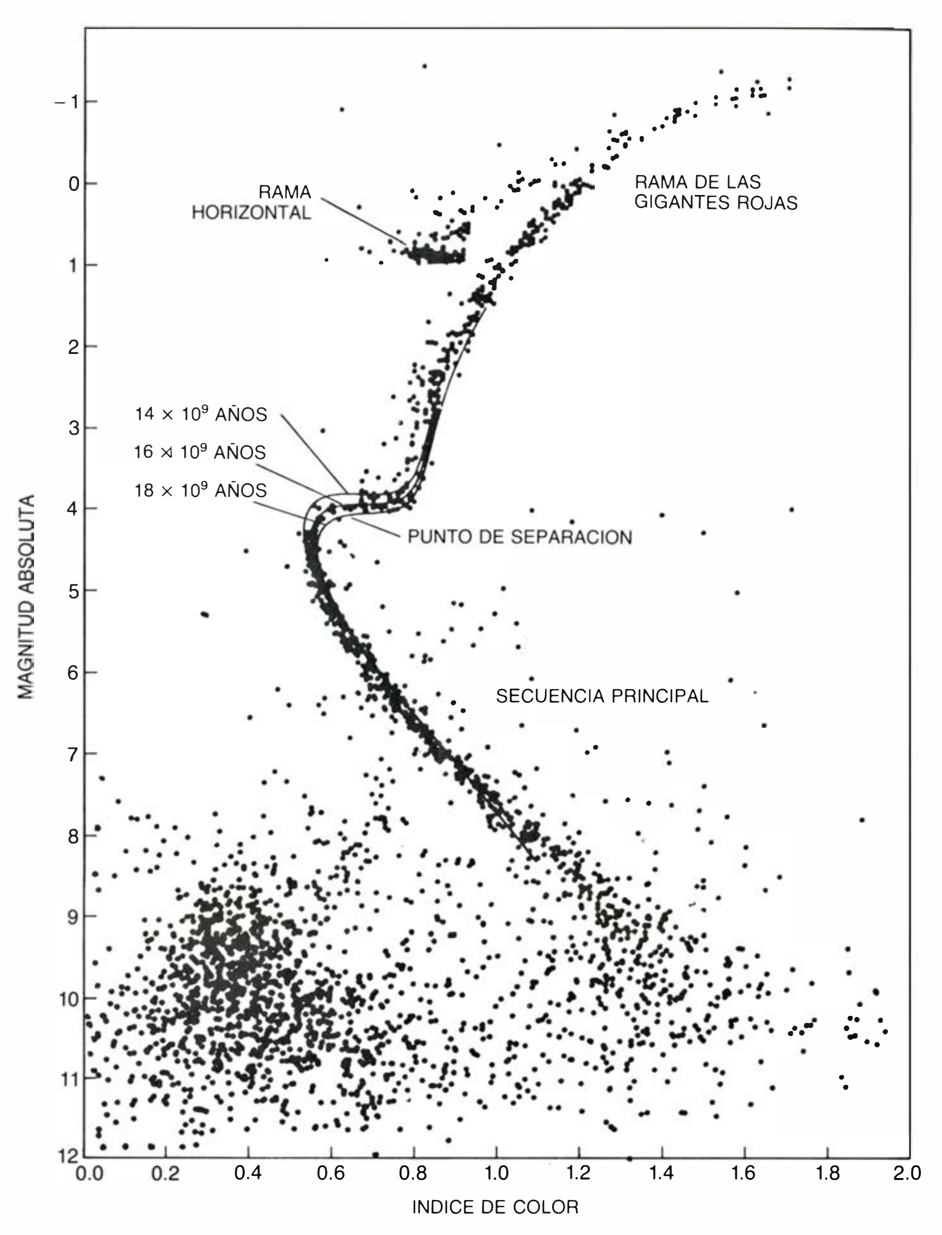
Más difícil resulta deshacer el enigma de cómo adquirieron los cúmulos globulares elemento pesado alguno, si partimos de que la gran explosión produjo sólo hidrógeno y helio. Las abundancias de metales observadas, muy bajas comparadas con las de las estrellas de la población I, no son, empero, insignificantes. Debió haber, por tanto, una generación anterior de estrellas, dentro de las cuales se sintetizaron los elementos pesados que ahora se encuentran en las que constituyen los cúmulos. Hasta el presente, nadie ha detectado señales de población primitiva en forma de estrellas más antiguas que los cúmulos globulares.

Por ser éstos los objetos más antiguos de cuantos se conocen del halo de la Vía Láctea, su edad fija un límite inferior a la edad del propio universo. Esta restricción en la que ha de moverse la teoría cosmológica reviste especial valor hoy, cuando la cosmología observacional atraviesa una situación deprimente. Allan R. Sandage, de los observatorios de Monte Wilson y de Las Campanas, definía en cierta ocasión la cosmología como "la búsqueda de dos números": la presente velocidad de expansión del universo y la velocidad a la que el ritmo de expansión está disminuyendo. (La expansión del universo es un hecho, como lo prueba el corrimiento hacia el rojo del espectro de las galaxias distantes, que demuestra que se están alejando de la nuestra a una velocidad proporcional a su distancia.) Ningún número de esos dos se ha conseguido determinar por observación. La presente velocidad de expansión, también llamada constante de Hubble, es, en principio, la más fácil de calcular de las dos y, sin embargo, una disputa acerca de su valor ha dividido a los cosmólogos en campos rivales. Uno de ellos, acaudillado por Marc Aaronson, de la Universidad de Arizona, y Jeremy R. Mold, del Instituto de Tecnología de California, sitúa la constante de Hubble entre 80 y 100 kilómetros por segundo por cada millón de parsecs; Sandage y su colega Gustav A. Tammann opinan que el valor correcto es sólo un poco más de la mitad de aquél, aproximadamente 55 kilómetros por segundo y por megaparsec.

El valor de la constante de Hubble

guarda directa relación con la edad del universo, pues extrapolando hacia atrás la velocidad de expansión llegamos al instante en que ésta comenzó. Resulta verosímil que la atracción gravitatoria mutua de las galaxias haya retardado la expansión, que se mostraría más rápida aún en el pasado; así pues, la extrapolación a partir de la constante de Hubble da un límite superior. De los dos valores propuestos, el más alto implica que el universo no tendría más de 10.000 u 11.000 millones de años; con ello, se entra en conflicto con los mejores datos de los cúmulos globulares, que asignan a éstos edades de 13.000 millones de años, por lo menos.

Si el valor más bajo de la constante de Hubble, defendido por Sandage y Tamman, es correcto, la gran explosión pudo ocurrir hace incluso 20.000 millones de años. Pero muchos cosmólogos creen que, como resultado de ciertos descubrimientos en física de partículas, la velocidad a la cual la expansión se está retardando –el segundo número cosmológico– es grande [véase "El universo inflacionario", de Alan H. Guth y Paul J. Steinhardt: INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio 1984]. En tal caso, hasta el valor más bajo de la constante de Hubble exige que el universo no supere los 12.000 o 13.000 millones de años de antigüedad; lo que sigue siendo incómodamente bajo, si consideramos las edades de los cúmulos globulares. No se ve por dónde vendrá la resolución del conflicto.



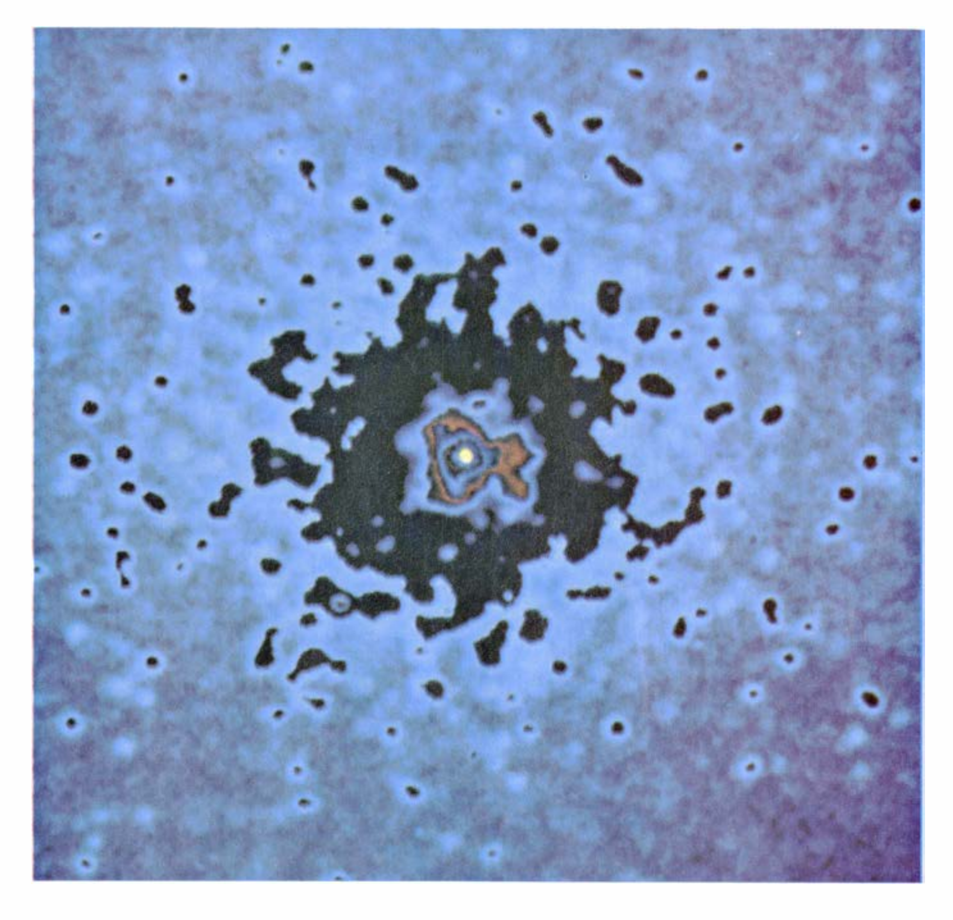
4. PARA ESTIMAR LA EDAD DE UN CUMULO GLOBULAR se compara un modelo teórico de la evolución estelar del cúmulo con su distribución observada en el diagrama de H-R. La distribución estimada con un modelo de evolución, especialmente el punto de separación, depende de forma sensible de la edad supuesta para el cúmulo en los cálculos. El diagrama de H-R representado aquí corresponde al cúmulo globular gigante 47 de Tucana. La mayoría de los datos los obtuvieron James E. Hesser, del Observatorio Astrofísico del Dominio, y William E. Harris, de la Universidad McMaster, con el telescopio de cuatro metros del Observatorio Interamericano de Cerro Tololo, en Chile. Los modelos teóricos (*líneas negras*) fueron calculados por Don A. Vandenberg, de la Universidad de Victoria. El "mejor ajuste" del punto de separación lo presenta un modelo correspondiente a un cúmulo de 16.000 millones de años de edad. La mayoría de las estrellas del ángulo inferior izquierdo de la ilustración pertenecen, en realidad, a la Pequeña Nube de Magallanes, una galaxia que se encuentra detrás de 47 de Tucana.

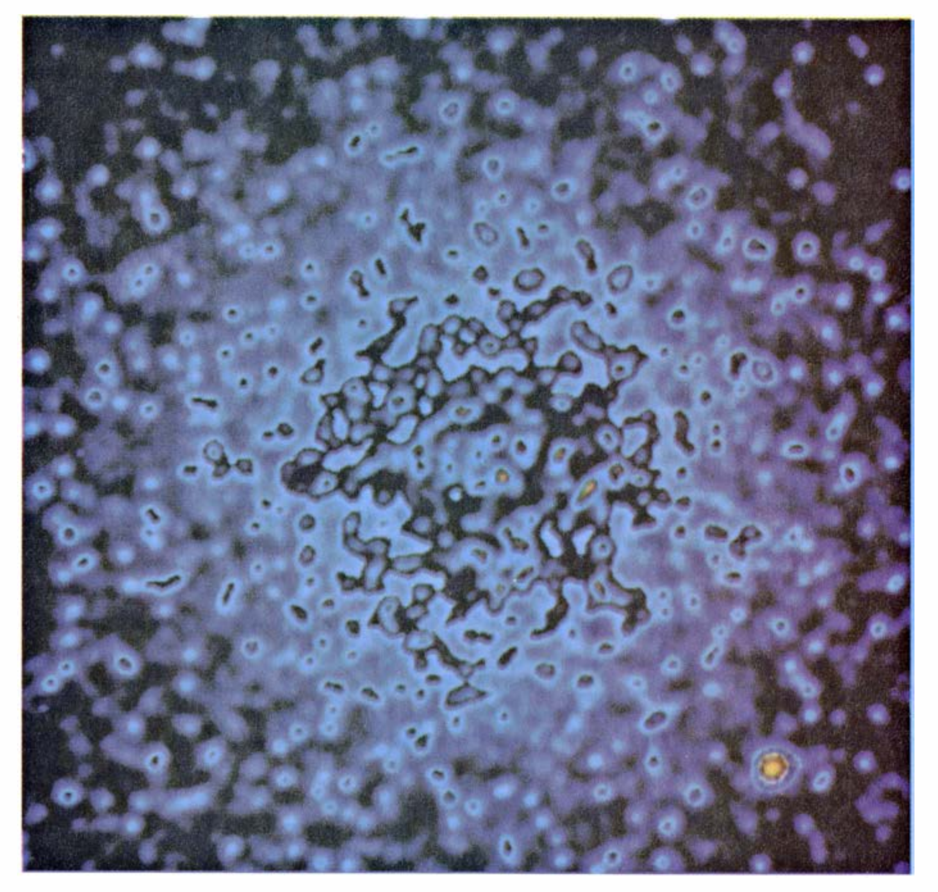
Formación de galaxias

Además de estar relacionados con la fecha de la gran explosión, los cúmulos globulares ofrecen pistas que nos llevan hasta la formación de las galaxias. Poco después de la primitiva bola de fuego, la masa difusa y uniforme de hidrógeno y helio comenzó a fragmentarse en vastas nubes, cuyo tamaño quedó determinado por el equilibrio entre la gravedad, que tendía a atraer el gas, y el calor, que tendía a dispersarlo. P. J. E. Pebbles y Robert H. Dicke, de Princeton, han sugerido que las nubes pregalácticas, que surgieron en gran número, tenían con toda probabilidad un tamaño semejante al de los cúmulos globulares. Las nubes se movieron juntas a la deriva bajo su mutua atracción gravitatoria. Aunque la mayoría de ellas se fundieron e integraron las aglomeraciones que crearon las galaxias, algunas escaparon de las colisiones, mientras permanecían unidas gravitatoriamente a las estructuras galácticas mayores. Tales nubes, de acuerdo con Pebbles y Dicke, acabaron formando los cúmulos globulares del halo galáctico.

Si este cuadro es correcto, algo habrá que modificarlo para explicar la formación de galaxias distintas de la Vía Láctea. Además de los 125 cúmulos globulares conocidos en nuestra galaxia (en números redondos), se han identificado varios miles en cada una de cierto número de otras galaxias. La mayoría de esos cúmulos lejanos son muy débiles, lo que justifica que la investigación no se ocupara de ellos hasta hace poco. Y ya han aparecido diferencias entre galaxias. Así, en la Vía Láctea, todos los cúmulos globulares son viejos; los cúmulos abiertos del disco galáctico, jóvenes, no encierran tantas estrellas; la Nube de Magallanes, por contra, contiene agregaciones jóvenes y ricas en estrellas que se parecen mucho a los cúmulos globulares. Se ignora por qué las Nubes de Magallanes, nuestro vecino galáctico más próximo, están produciendo todavía cúmulos ricos, fenómeno que no ocurre en la Vía Láctea.

Tampoco se sabe por qué las galaxias elípticas parecen tener muchos más cú-





5. EL COLAPSO DEL NUCLEO produce un notable máximo de la densidad de estrellas en el centro de un cúmulo globular, con el correspondiente máximo de brillo. Tal máximo es visible en el mapa generado por ordenador en falso color de la distribución del brillo del cúmulo NGC 6624 (*arriba*). No hay señal discernible de colapso del núcleo en el mapa de 47 de Tucana (*abajo*), aunque el brillo de ese cúmulo también aumenta hacia el centro. El autor y su colega Stanislav Djorgovski han hallado media docena de cúmulos globulares, por lo menos, que han sufrido colapso nuclear. (Estos mapas los realizó Djorgovski.)

mulos globulares por unidad de masa que las galaxias espirales. La observación reviste particular interés ya que representa una sólida objeción contra una teoría extendida sobre la formación de las galaxias elípticas. Alar Toomre, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y otros investigadores, han propuesto que las galaxias elípticas aparecen cuando las galaxias espirales chocan y se sueldan. La prueba más firme contra esta hipótesis es la mayor proporción de cúmulos en las elípticas.

Estructura y dinámica

Tan fascinante como las implicaciones de los cúmulos globulares en la formación de las galaxias es la estructura de los propios cúmulos. ¿Cómo produce la interacción de miles de estrellas una forma conjunta de semejante regularidad y sencillez? Cada estrella se mantiene en el cúmulo por la atracción gravitatoria conjunta de todas las demás; describe bucles hacia dentro y hacia fuera en una órbita regular, en roseta, cuyo período es del orden del millón de años. Por término medio, en un momento dado, la mitad de las estrellas se están moviendo hacia dentro y la mitad hacia fuera. Sus velocidades son, justamente, de un valor suficiente para equilibrar la gravitación que, en otro caso, las atraería hacia el centro. Con mayor precisión, existe una correspondencia exacta entre la distribución de velocidades estelares y la distribución radial de estrellas, que determina el perfil de densidad del cúmulo y, por ello, su campo gravitatorio.

En principio, caben muchos emparejamientos diferentes de esas dos magnitudes, pero la semejanza estructural de la mayoría de los cúmulos globulares sugiere que ciertas distribuciones de velocidad y densidad son las preferidas. Provienen de la naturaleza de las interacciones estelares en un cúmulo. Aunque el movimiento de cada estrella está regido, casi completamente, por el campo gravitatorio, bastante uniforme, de todas las demás, rara vez dos estrellas se acercan hasta el extremo de influir una en el movimiento de la otra. El intercambio de energía que proviene de tales encuentros estelares aleatorios tiende a producir lo que se llama una distribución maxwelliana de velocidades, en honor del físico escocés James Clerk Maxwell, quien dedujo una fórmula estadística para describir los movimientos de las moléculas de un gas.

Al tener una velocidad de escape finita, los cúmulos globulares no pueden alcanzar distribuciones enteramente maxwellianas, que incluirían objetos de

todas las velocidades; las estrellas aceleradas hasta grandes velocidades por encuentros estelares adquieren energía suficiente para escapar del campo gravitatorio del cúmulo. Mas, por debajo de esa velocidad de corte, la distribución de velocidades en un cúmulo se aproxima mucho a la dada por la fórmula de Maxwell. La distribución de velocidades, a su vez, determina el perfil radial de densidad.

No todos los cúmulos globulares poseen idéntica estructura. Hará unos veinte años el autor estudió bastantes y vio que sus diferencias estructurales respondían a tres variables: el radio del núcleo central, el radio externo y el número de estrellas encerradas. La diferencia principal de un cúmulo a otro reside en el radio del núcleo, que se define como aquel para el cual la densidad de estrellas de la imagen del cúmulo ha descendido a la mitad de su valor en el centro. Unos cúmulos tienen núcleos más pequeños y densos que otros; están más estrechamente apretados y sus velocidades de escape son, en correspondencia, más altas. Se llama velocidad de escape a la que debe adquirir una estrella para alcanzar el radio exterior del cúmulo. A diferencia del borde del núcleo, el radio exterior no está determinado sólo por la energía gravitatoria de enlace del cúmulo. Viene a ser un límite de marea definido por el campo gravitatorio de la galaxia, que tiende a extraer estrellas del cúmulo.



6. INTERVALO DE VARIACION DE PROPIEDADES entre cúmulos globulares. Lo ilustra una fotografía de dos que, casualmente, caen en la misma dirección. M53 (*parte superior derecha*), en la constelación Cabellera de Berenice, es típica de los cúmulos densos y ricos en estrellas ligadas. En cambio, NGC 5053 (*parte inferior izquierda*) es un cúmulo apenas concentrado que no consta de tantas estrellas.

Evolución dinámica

Los cúmulos globulares tienen una vida larga; pero no son inmutables. Lenta y continuamente, las estrellas se "van evaporando" del cúmulo a medida que alcanzan la velocidad de escape. La teoría que predice la evolución resultante del cúmulo no muestra grandes dificultades, aunque permanecen oscuros muchos pormenores.

La energía de enlace de un cúmulo es, en realidad, una falta de energía: la que se necesitaría para acelerar todas las estrellas hasta su velocidad de escape y destruir el cúmulo. Para alcanzar la velocidad de escape, una estrella debe adquirir suficiente energía cinética positiva que supere la energía gravitatoria negativa del cúmulo. Así, las estrellas que escapan son las dotadas de mayor energía cinética, mientras que la cantidad de energía gravitatoria con que contribuyen al cúmulo no es superior al valor medio. De ello resulta que la evaporación de estrellas aumenta la cantidad de energía de enlace por estrella que queda en el cúmulo, y éste se contrae.

De acuerdo con la teoría vigente, no se alcanza un régimen estacionario. Antes bien, la energía de la contracción se convierte en energía cinética de movimiento estelar, lo que provoca el "calentamiento" del núcleo. Se evaporan más estrellas y el núcleo continúa contrayéndose y calentándose ilimitadamente, hasta que se adquiere una densidad infinita. Donald Lynden-Bell, de Cambridge, uno de los autores de la teoría, ha bautizado este fenómeno de realimentación positiva como "catástrofe gravotérmica".

Cuando Michel Hénon, del Observatorio de Niza, propuso la teoría, en 1960, había pocas pruebas observacionales que la confirmaran. Sólo un cúmulo globular, el M15, daba señales del brusco máximo de densidad que podría esperarse en un núcleo contraído. Sin embargo, el autor y su colega Stanislav Djorgovski recientemente han estado realizando observaciones muy cuidadosas de múltiples cúmulos globulares. Media docena de ellos, por lo menos, muestran máximos centrales de densidad que creemos dan fe de la contracción del núcleo. Cierto es que media docena no son muchos; las teorías de la evolución de los cúmulos predicen que una fracción mucho mayor de los antiguos cúmulos globulares del halo de la Vía Láctea debería haberse colapsado ya. (Los modelos analíticos y numéricos concuerdan también en la predicción según la cual, una vez el núcleo ha comenzado a contraerse, el colapso prosigue con vertiginosa rapidez y sería altamente improbable llegar a observar su progreso.) ¿Por qué no se han detectado otros máximos en la densidad central?

Quizás se deba a que las escalas de tiempo predichas para el colapso sean demasiado cortas. O tal vez mejor, que algún mecanismo detenga el colapso y determine incluso que el núcleo se vuelva a dilatar hasta su tamaño normal.

Estrellas binarias

Las estrellas binarias –parejas de estrellas que la gravedad liga entre sí en órbitas muy próximas– podrían servir para desentrañar el mecanismo. Nada menos que en 1959, las simulaciones numéricas de Sebastian von Horner, del Observatorio Nacional de Radioastronomía, demostraron que las estrellas binarias tendían a formarse en cúmulos de estrellas a raíz de encuentros accidentales en los que tomaban parte tres estrellas. En simulaciones posteriores de Sverre Aarseth, de Cambridge, la contracción del núcleo se detenía casi invariablemente ante la formación de una masiva estrella binaria central que, en sus encuentros con otras estrellas, les daba "coces" y las enviaba a órbitas más altas.

Los modelos de Aarseth eran de cúmulos abiertos que contenían no más de 500 estrellas; Lyman Spitzer, Jr., y Michael Hart, de Princeton, mostraron, ulteriormente, que los encuentros de tres cuerpos producían estrellas bi-

narias con mucha menor probabilidad en cúmulos globulares, que suelen constar de 100.000 estrellas o más. La razón hay que buscarla, en parte, en las velocidades estelares de los cúmulos globulares, mucho mayores. Sin embargo, a medida que el núcleo de un cúmulo globular colapsa, se separa de la envoltura que lo rodea. Así, con el tiempo, podría acabar por albergar el número de estrellas suficiente para instar la formación de binarias. Por otro lado, Andrew Fabian, James Pringle y Martin J. Rees, de Cambridge, han demostrado que los encuentros de dos estrellas pueden también provocar la formación de binarias muy próximas. Un mecanismo de esos, si no los dos, podría actuar en un pequeño y denso núcleo de un cúmulo y producir las binarias necesarias para detener el colapso.

Hacia la época en que el núcleo ha menguado en cuantía suficiente, su tamaño, se tornará probablemente indiscernible de un núcleo completamente colapsado, de acuerdo con los actuales niveles de resolución. Mostraría a buen seguro la clase de máximo de densidad que Djorgovsky y el autor han observado. Para explicar por qué tales máximos no se han detectado en otros cúmulos, hay que postular que la energía con que contribuyen las binarias a las estrellas de un núcleo contraído basta para dilatar de nuevo el núcleo. Aunque atractiva, no se ha podido establecer hasta qué punto es plausible esa idea.

Por desgracia, los centros de los cúmulos globulares, muy densos, desaniman cualquier esperanza de observar directamente las estrellas binarias mediante telescopios instalados en la Tierra. Sin embargo, los rayos X de alta energía que emanan de varios cúmulos pueden considerarse prueba indirecta de estrellas dobles. Hubo un tiempo en que estaba de moda sugerir que los rayos X procedían de materia que se estrellaba en el inmenso campo gravitatorio de un agujero negro. No obstante, sería de esperar que un objeto de tan ingente masa se encontrase en el mismo centro del cúmulo, mientras que estudios recientes de Jonathan E. Grindlay, de la Universidad de Harvard, y sus colaboradores, han mostrado que las fuentes de rayos X de los cúmulos globulares están ligeramente descentradas. La explicación más probable hace, de las fuentes, estrellas binarias muy próximas, donde la materia de una estrella dilatada sufre la atracción del intenso campo gravitatorio de la otra, que es una estrella de neutrones o una enana blanca.

Casi todas las fuentes de rayos X de los cúmulos globulares están situadas en regiones densas del núcleo; es natural, pues, sugerir que las estrellas binarias responsables detengan el colapso. Verdad es que no hay razón alguna para suponer que las estrellas binarias que estabilizan el núcleo tengan que ser binarias de rayos X; de hecho, varios cúmulos de núcleo colapsado que el autor y su colega han encontrado carecen de fuentes de rayos X. A la inversa, varios de los cúmulos conocidos con rayos X no muestran contracción nuclear. Un núcleo denso puede favorecer la formación de binarias en general, ya que facilita las aproximaciones estelares.

Perspectivas

Los concurridos centros de los núcleos globulares pueden revelar muchos de sus secretos al Telescopio Espacial, cuyo lanzamiento está proyectado para 1986. Las observaciones desde el suelo ven limitada su resolución, por la turbulencia atmosférica sobre todo. El telescopio orbital de 2,4 metros tendrá un poder de resolución unas 20 veces mayor que el de los mejores instrumentos instalados en tierra.

Mientras tanto se prepara el proyecto, los avances observacionales más rápidos se están desarrollando en el estudio de los movimientos de las distintas estrellas de los cúmulos. Los nuevos espectrógrafos digitales miden ya el movimiento de la estrella a lo largo de la visual, apoyados en el corrimiento Doppler de su espectro. Esta técnica resulta más precisa que el método tosco de medir velocidades transversales a partir de los pequeños corrimientos de las estrellas en fotografías tomadas con intervalos temporales de decenios. Las mediciones Doppler añaden una nueva dimensión al conocimiento de la estructura de los cúmulos.

Como todos los trabajos de astronomía, el estudio de los cúmulos globulares se ha beneficiado enormemente de esas mejoras técnicas. A ello hay que sumar las ventajas que este campo recibe de su posición en la intersección de varios caminos de investigación; deuda que es recíproca, por cuanto la profundización en el dominio de los cúmulos ha resultado esencial para muchos descubrimientos fundamentales en astronomía. Esta ubicación privilegiada, por encima de cualquier avance técnico, permite al estudioso de los cúmulos globulares ver con optimismo el futuro. De muchísimas partes podrían llegarle nuevas ideas.

Los primeros organismos

Los sistemas más primitivos capaces de evolucionar por selección natural pudieron tener organización y composición muy diferentes de las que presentan los actuales. ¿Eran, acaso, cristales de arcilla?

A. G. Cairns-Smith

Entre las formas de vida, aparentemente variadas, que medran hoy sobre la tierra destaca una curiosa similitud: se ha comprobado que el núcleo del mecanismo molecular de todos los organismos modernos es, esencialmente, el mismo. Posiblemente la existencia de esa unidad bioquímica constituya uno de los grandes descubrimientos de los últimos cien años. Y ello, qué duda cabe, arroja algo de luz sobre la historia evolutiva. Sin embargo, a mi entender, tal unidad bioquímica no ofrece, por sí misma, gran ayuda a la investigación sobre el propio origen de la evolución.

En este tema no coincido con la corriente de opinión dominante. Suele suponerse que antes de que apareciese cualquier tipo de organismo, esto es, antes de que existiesen sistemas capaces de evolucionar indefinidamente por selección natural, hubo otro tipo de evolución, una "evolución química", que produjo un conjunto básico de tipos de moléculas que constituyen el "equipo de construcción" con el que se elaboran los organismos actuales: aminoácidos, azúcares, etcétera.

Esta interpretación data de la década de 1920, cuando el bioquímico ruso A. I. Oparin y el biólogo británico J. B. S. Haldane introdujeron la hipótesis de que en los océanos de la tierra prevital se daba un "caldo primordial" de moléculas orgánicas, formado geoquímicamente por la acción de diversas fuentes de energía sobre una atmósfera parecida a la de Júpiter, en la que predominaban gases no oxidados, como metano, amoníaco e hidrógeno. Tal era la opinión que sobre la atmósfera primordial tenía Harold Urey. La hipótesis recibió el apoyo de un experimento desarrollado por Stanley L. Miller, a principios de la década de 1950, siendo alumno de Urey. Miller atravesó con descargas eléctricas ("relámpagos") una mezcla de gases que supuestamente constituían la atmósfera primitiva. Aparecieron moléculas orgánicas solubles en agua. Una cantidad no inferior al 15 por ciento del carbono, que inicialmente se hallaba en forma de metano, pasó a formar parte de un limitado conjunto de pequeñas moléculas, entre ellas cuatro aminoácidos de los 20 que constituyen las proteínas. Sin duda, muy espectacular. Lo mismo que el experimento realizado por Juan Oró a principios de los años 60, en el que demostró que, en un solo paso, las moléculas de cianhídrico (HCN) se unen para formar adenina. Miller ya había verificado que en sus experimentos con descargas eléctricas se producía cianhídrico, y que también se producía otra molécula pequeña, formaldehído (CH_2O), de la que desde hace 100 años se conocía su tendencia a unirse y dar lugar a azúcares, como la ribosa, un constituyente del ARN.

La formación de un equipo simple de construcción parecía sólo cuestión de tiempo. No preocupaba que algunos escépticos adujesen que la atmósfera primitiva de la tierra no era similar a la de Júpiter (un punto de vista generalizado hoy), pues en experimentos con atmósferas simuladas diferentes, y con otras fuentes de energía, a menudo se producían similares mezclas de aminoácidos.

Las esperanzas iniciales, sin embargo, no se han cumplido. A duras penas se ha mejorado el experimento de Miller. En los ensayos más realistas que simulan las posibles condiciones primitivas de la tierra hasta incluso las moléculas más simples se producen en cantidades pequeñas. Peor aún, estas moléculas suelen ser constituyentes minoritarios de los precipitados y resulta muy difícil que se pudieran separar y purificar a través de procesos geoquímicos, que normalmente tienden a formar mezclas orgánicas cada vez más enmarañadas. Con moléculas algo más complejas, esas dificultades crecen enormemente. En concreto, el origen estrictamente geoquímico de los nucleótidos (las unidades constituyentes del ADN y ARN) presenta grandes dificultades y, en cualquier caso, no se han obtenido aún en experimentos reales del tipo del realizado por Miller.

A pesar de ello, ¿no es de sentido común que se formen primero las piezas de construcción y, por otra parte, acaso no siguen existiendo dos hechos incontrovertibles que así lo avalan?

1. Las moléculas fundamentales de la vida son las mismas en todos los organismos terrestres actuales.

2. Al menos algunas de esas moléculas pueden formarse bajo condiciones que bien pudieran haberse dado en la tierra primitiva.

Por separado, estas premisas son puros señuelos y, juntas, dos afirmaciones nefastas.

El primer señuelo pone de manifiesto su carácter cuando, al analizar la unicidad bioquímica, se recuerda que los organismos actuales tienen en común mucho más que un equipo de construcción de pequeñas moléculas. Presentan también un sistema, un diseño esquemático completo, que es siempre el mismo. El mecanismo de funcionamiento de tal sistema es extraordinariamente complejo. Considérese que una molécula de proteína es un objeto complejo, una organización específica de miles de átomos; se necesitan cientos de ellas bien formadas. Uno de los lugares donde más precisas resultan las proteínas (y donde tienen que ser más eficaces) es en la maquinaria de fabricación de las mismas. Lo cual constituye un círculo vicioso, un ejemplo claro de otro de los aspectos de la unidad bioquímica: la profunda interdependencia de todos los componentes del mecanismo básico. Finalmente, se advierte cierta arbitrariedad en algunas características de ese mecanismo. El código para convertir los mensajes del ARN en secuencias de proteínas es casi el mismo en todas partes, y el conjunto de aminoácidos es constante. Cuesta creer que sólo pudiera existir un único código o un solo conjunto funcional de

aminoácidos, y que haya sido el mejor para todos los organismos bajo cualquier circunstancia.

Seguramente las conclusiones adecuadas que cabe extraer de un estudio detallado de la unidad bioquímica son: (1) toda la vida que alienta hoy en la tierra tiene un ancestro común; (2) ese antecesor ocupaba un lugar bastante alto del árbol evolutivo y (3) en ese punto el sistema bioquímico básico estaba ya fijado. Que dicho sistema se haya mantenido constante durante tanto tiempo se debe, parece verosímil, a su característica e interdependiente complejidad. Es esa la complejidad típica de la ingeniería de "alta tecnología", caracterizada por constar de muchos elementos, muy específicos, que dependen de tal manera unos de otros que todos son insustituibles. Tal tipo de perfección se consigue sólo por evolución. Debe admitirse que al menos la selección de los componentes que se fijaron fue también producto de la evolución. En conclusión, la unidad bioquímica no nos conduce al inicio de la evolución, sino a una etapa muy posterior de la misma.

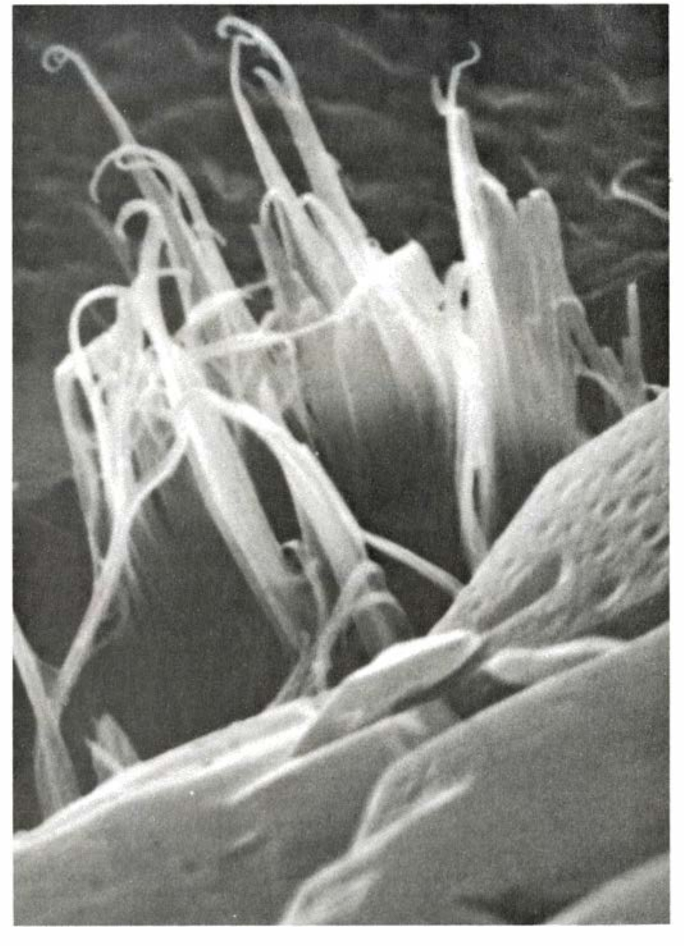
Podríamos expresar el segundo señuelo en los siguientes términos: "Algunos de nuestros componentes bioquímicos se forman fácilmente, y punto". A ello, el trabajo posterior a Miller suma que parte de los productos bioquímicos básicos, en especial los aminoácidos más simples, se forman fácilmente en todas las condiciones, no sólo en las que se creen características de la tierra primitiva. La expresión "y punto" excluye cualquier interpretación histórica simple, pues resulta lógico pensar que un proceso evolutivo también actuase sobre los componentes, algunos de los cuales, además de no ser difíciles de unir, eran suficientemente estables. Como en el primer señuelo, tampoco existe una referencia concreta a la raíz del árbol evolutivo.

Por supuesto, todo ello no descarta que los primeros organismos estuvieran formados por moléculas similares a las de los organismos actuales, si bien cabe considerar ese supuesto una hipótesis carente de especial garantía.

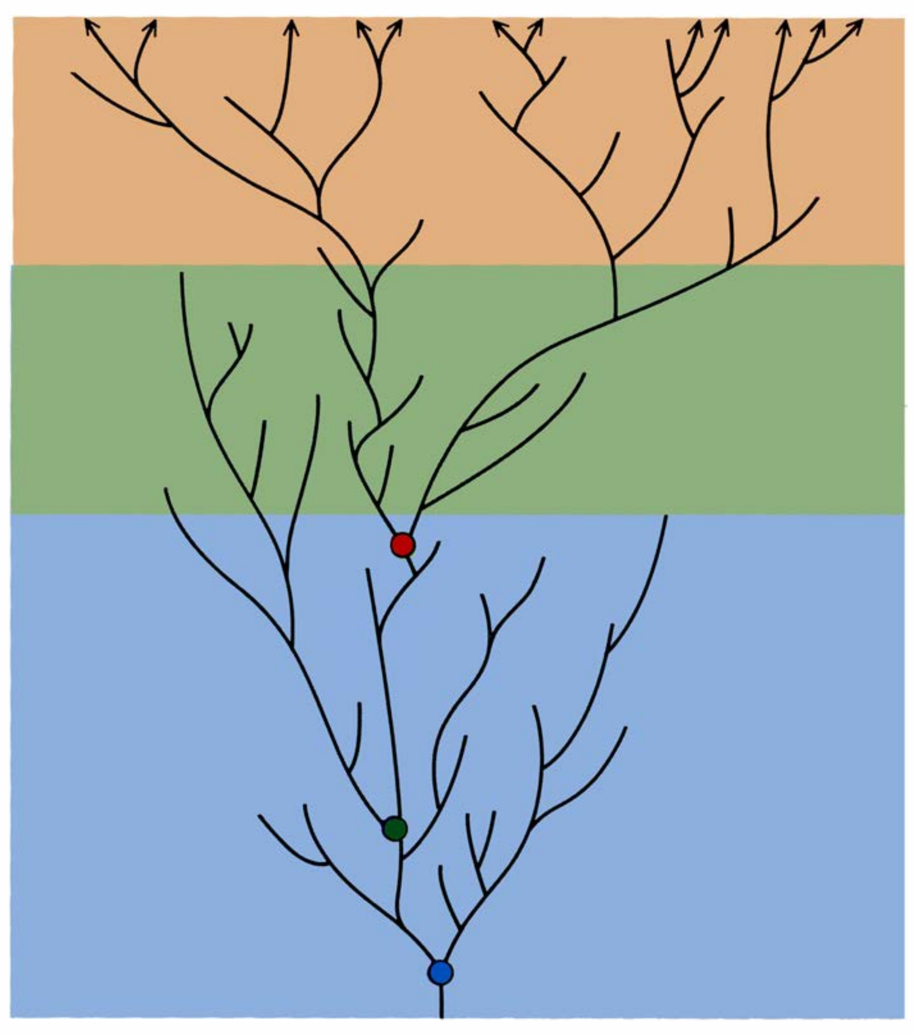
Buenas razones avalan la duda. Surgen de la interdependiente complejidad de tipo "alta tecnología" que caracteriza los procesos bioquímicos fundamentales. Los primeros organismos no tuvieron por qué ser así. Debieron ser máquinas de "baja tecnología", fáciles de ensamblar; y las habría en versiones simples funcionales (dardos más que ametralladoras). Hay en este enfoque un matiz que puede llevarnos a considerar que los primeros organismos estaban constituidos de forma diferente, y con distintos materiales, que los actuales. Es cierto que los artefactos humanos "de baja y alta tecnología" requieren varios tipos de componentes y materiales. Resulta inútil buscar cuentas de ábaco de madera en una calculadora de bolsillo. (Perderíamos el tiempo si buscáramos siquiera algo de madera en ella.)

Por tanto, debemos plantearnos la duda de si los aminoácidos, óptimo material del que se componen los catalizadores (habida cuenta de la tecnología en cuestión), serían igualmente los idóneos para que éstos comenzaran a entrar en acción. Cabe dudar de si los aminoácidos, o cualquier otro compuesto bioquímico de los imprescindi-

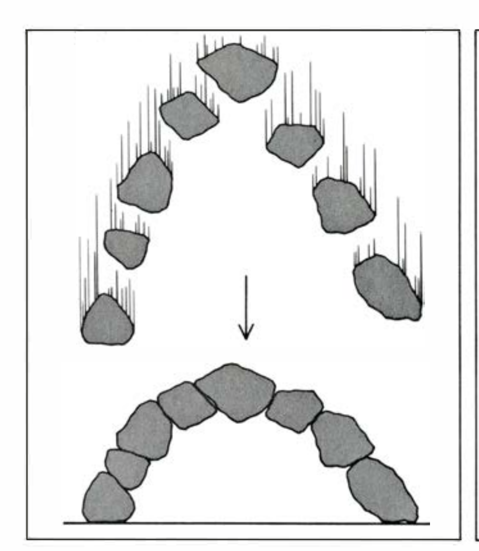


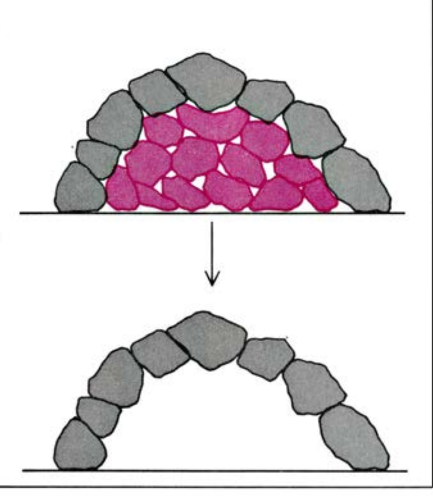


1. CRISTALIZACION DE LA ARCILLA a partir de las disoluciones que se producen en la meteorización de las rocas y que percolan a través de ellas. La fotografía de la izquierda, obtenida con microscopio electrónico por W. D. Keller, muestra cristales de halloisita, aumentados 3750 veces, formados en agua filtrada a través de grietas de granito. En la microfotografía de la derecha, tomada por David W. Houseknecht, de Missouri, se observan cristales de illita, aumentados 16.000 veces, formados en los poros de unas areniscas. Estos procesos pudieron desempeñar un papel decisivo en el origen de la vida.



2. ARBOL EVOLUTIVO IMAGINARIO generado por un proceso de ramificaciones y extinciones al azar. El esquema representa árboles de especies actuales (*flechas de la línea superior*). Se advierte que todas ellas están relacionadas por puntos de ramificación ancestral a cierta distancia de la base del árbol. (Según crece el árbol, los puntos de ramificaciones importantes pueden cambiar de ubicación, pero sólo para situarse en niveles más altos.) Dado que la evolución tiene lugar a través de ramificaciones y extinciones, no resultaría sorprendente que todos los organismos actuales tuvieran un ancestro común bastante evolucionado. Todos los organismos actuales se sirven de un complejo mecanismo molecular muy similar, pero de ello no cabe deducir que dicho mecanismo fuese también el de los primeros organismos.





3. ORIGEN DE UN SISTEMA cuyas partes están interrelacionadas. Como ocurre en un arco de piedra, puede depender de circunstancias fortuitas y extraordinarias (*izquierda*). Aunque no resulta evidente, es más probable que dicho sistema se construya sobre un andamiaje, que luego desaparece. Las arcillas inorgánicas pudieron constituir el andamio que ayudase a la evolución del mecanismo molecular.

bles actualmente, serían de alguna utilidad en el momento inicial.

Los organismos contemporáneos están transidos de alta tecnología en todos los niveles. El ojo es el ejemplo clásico de mecanismo de precisión constituido por múltiples elementos que debe ser como es para que tenga alguna utilidad. "¿Cómo puede algo así evolucionar a través de pequeños pasos?" cuestionan los antidarwinistas, seguros de su golpe decisivo. Pero puede rebatírseles: no hay en ello paradoja alguna. A través de procesos evolutivos graduales puede aparecer una refinada tecnología.

Piénsese en un modelo simple de "estructura paradójica", como es el caso de un arco de piedras. ¿Cómo construirlo gradualmente, bloque a bloque? La respuesta es: con un andamiaje. Para empezar hay que construir un andamio, que es, en sí mismo, una estructura "no paradójica", pues se puede fabricar pieza a pieza.

A mi entender, así se construyó inicialmente nuestra impresionante e interdependiente bioquímica. Las partes que actualmente se apoyan unas en otras seguramente se apoyaron antes en otros elementos distintos; elementos de "baja tecnología". Posiblemente en la bioquímica actual queden aún piezas del andamiaje primitivo, si bien el andamio, como tal, ha desaparecido.

¿Cuál es el camino a seguir? ¿Qué decir de algo que se ha perdido?

Otra cuestión: ¿Cómo deducir las armas que utilizaron los hombres primitivos si no hubiesen quedado restos de sus actividades? No pensaríamos en instrumentos similares a las ametralladoras, aunque construidos con palos y piedras. Naturalmente, habría que pensar en un sistema más sencillo, a través del cual el hombre primitivo hubiera conseguido algún tipo de defensa. Para ello nos basaríamos en lo que se sabe de la utilización del arma, nivel tecnológico y materiales disponibles.

Siguiendo en esa línea, diremos de los primeros organismos que:

1. Podían evolucionar.
2. Eran de baja tecnología.
3. Estaban formados por compuestos geoquímicos.

Tomo estos supuestos como "guías", esto es, hipótesis que no sólo parecen verosímiles, sino que, además, resulta ventajoso seguir.

La primera guía resulta segura, pues se definió los organismos como sistemas capaces de evolucionar. Sin embargo, hay que ser exigente respecto del significado de "evolucionar", lo

cual nos obliga a describir con mayor precisión qué tipo de sistemas fueron los primeros organismos. Un organismo no puede evolucionar, sólo lo hacen los organismos en plural, las sucesiones de organismos. Incluso eso hay que aclararlo más. Puede evolucionar cuanto une a los organismos a través de las sucesiones; es decir, lo que se transmite de generación en generación. Que en realidad no es un material, sino información genética; no es materia, sino forma.

La información genética, naturalmente, se apoya en una materia: en algún tipo de genes. Además, la información genética tiene que expresarse mediante algo (el llamado fenotipo) que le ayude a sobrevivir y propagarse, y en ello probablemente participen otros materiales, aunque a la larga lo único que sobrevive es la propia información. Tras centenares de generaciones, todos los átomos de un conjunto de organismos iniciales desaparecen: no queda nada de la sustancia original. Sólo sobrevive, modificada o no, la forma. Requisito esencial de la evolución es que se produzca este juego de hacer pervivir la forma a través de copias repetidas de otras copias.

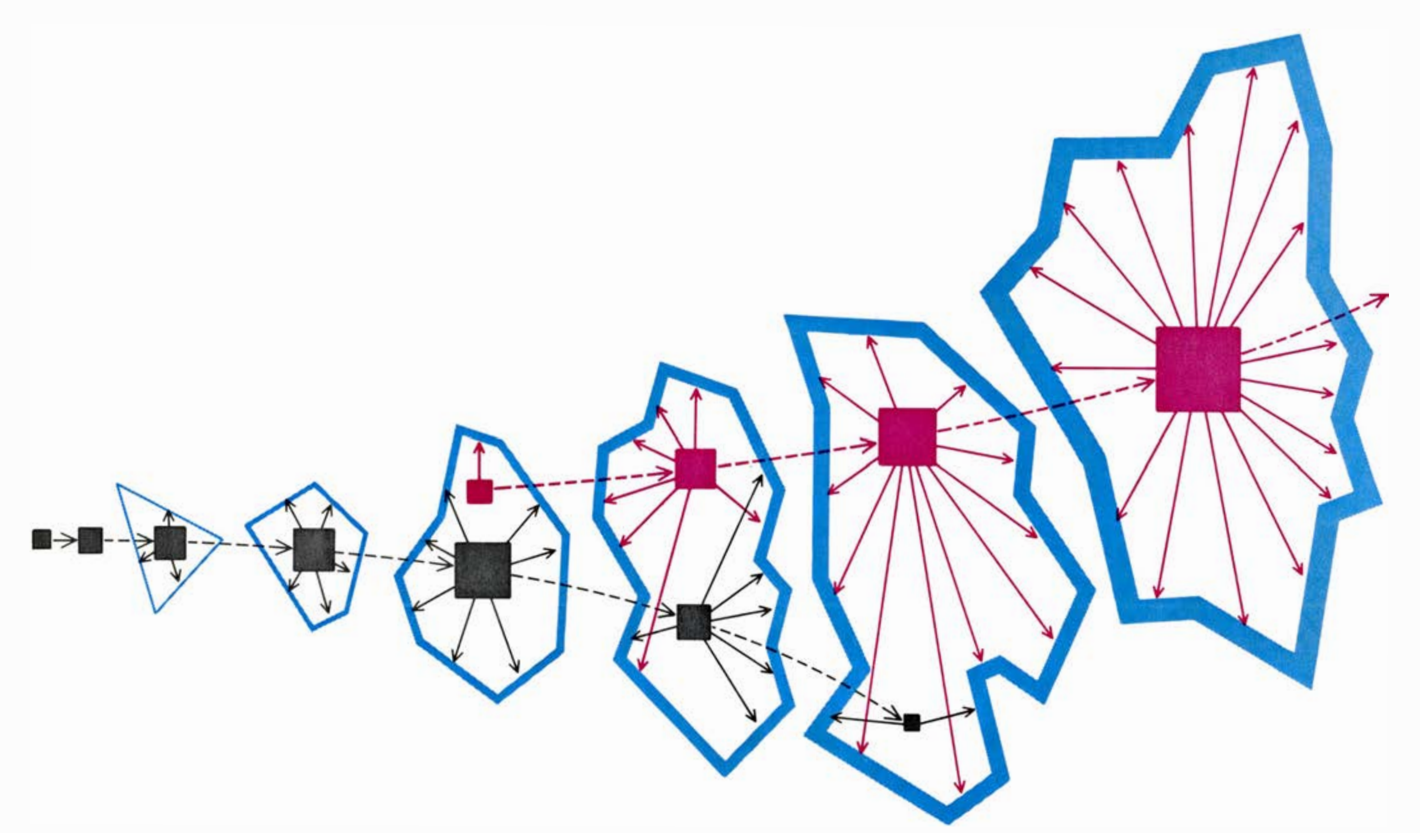
Para que se produzca la evolución, deben satisfacerse, además, otros requisitos. Deben producirse ocasionalmente cambios al azar en la información genética –mutaciones–, cambios que serán heredables y capaces de producir otros fenotipos, de suerte que pueda seleccionarse entre la información genética alterada. Así, a través de muchas generaciones, se transforman las líneas de sucesión de manera que la información genética se adecúe a la producción de fenotipos eficaces.

Aunque no se agota ahí cuanto podemos decir de la evolución, nos encontramos, sin embargo, con una condición *sine qua non*. Al margen de cualquier otra cosa que pudieran contener, los primeros organismos de baja tecnología, por simples que fuesen, debían disponer de algún tipo de genes.

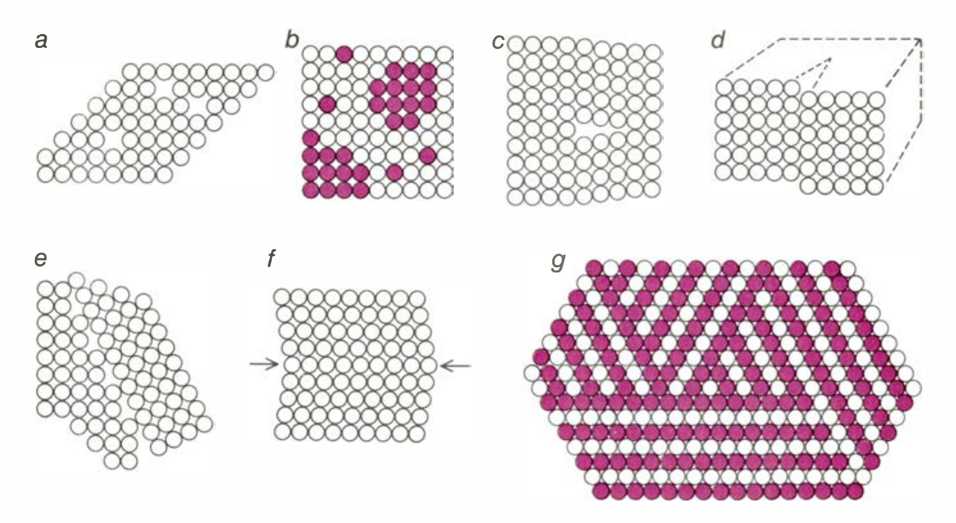
Además de los genes, ¿qué otros elementos necesitarían esos organismos iniciales? H. J. Muller avanzó una respuesta en 1926; la siguiente: "nada más". Las características mínimas necesarias para satisfacer las propiedades que a la sazón se atribuían a los genes bastarían, en principio, para que los genes evolucionaran por su cuenta. Muller fue aún más lejos: no sólo era posible imaginarse a los primeros organismos como simples genes, sino que realmente serían algo de ese tenor.

Muller defendió primero la necesidad absoluta de que existiese un gen, o varios. Supongamos que los primeros organismos hubieran de tener algo más. Para que los organismos se reprodujeran, esas estructuras acompañantes habrían de reelaborarse o readquirirse, lo que exigiría que los genes dispusieran de información adicional adecuada. Aunque nadie duda de que sea mucho mejor lograrlo sin "ayudas" de ese tipo, o con la mínima posible.

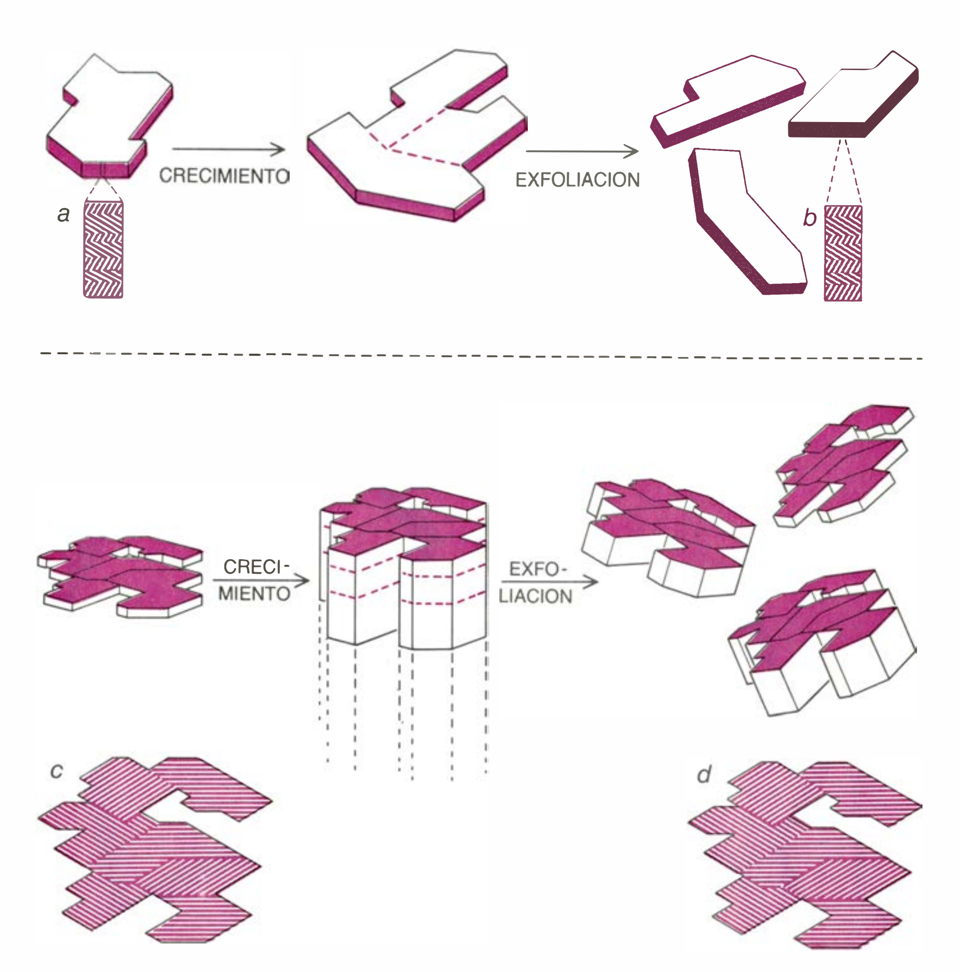
En esa misma línea de pensamiento se ha sugerido que el ARN pudiera constituir el material genético original. Pero en mi opinión es que el ARN se encuadra en una tecnología muy refinada. Bien es verdad que se ha observado la evolución de moléculas de ARN en tubo de ensayo. En este caso, la característica clave del ARN es que, al igual que el ADN, su secuencia de información puede copiarse, aunque tal información no tiene por qué transcribirse. Como en el caso de una cadena de proteína, la conformación espacial que adopte una cadena de ARN dependerá de la información encerrada. Estos experimentos son, sin duda, muy interesantes; pero cabe preguntarse si están realmente relacionados con el origen de la evolución. La enzima que sirve de catalizador en las experiencias con



4. TRASMUTACION GENETICA, que el autor considera paso clave en las primeras etapas de la evolución. Inicialmente existían genes desnudos, formados por un primitivo material genético desconocido (*cuadrados negros*), que llegaron, por evolución, a controlar el ambiente inmediato valiéndose de la producción, en su derredor, de fenotipos (*formas azules*) cada vez más elaborados. Apareció un tipo nuevo de genes (*cuadrados rojos*), que sólo podían actuar en el seno de un fenotipo específico, y que eran más eficaces que los genes primitivos. Los nuevos genes fueron controlando gradualmente el fenotipo, que pasó a depender exclusivamente de ellos. En última instancia, los genes originales desaparecieron. (Los dibujos son obra de George V. Kelvin.)



5. DEFECTOS DE LOS CRISTALES. Pueden generar numerosas configuraciones estables alternativas, condición imprescindible para almacenar información. Los dibujos corresponden a algunos defectos cristalinos frecuentes: (*a*) huecos en las redes; (*b*) sustitución de unidades o de zonas; (*c*) dislocación de una arista; (*d*) dislocación torsional y (*e*) elementos de enlace entre redes. En un cristal doble, las porciones con diferente orientación tienen un plano común (*flechas*) (*f*). En algunos grandes cristales (*g*) ciertos dominios presentan la misma composición, si bien siguiendo orientaciones espaciales distintas.



6. LOS GENES CRISTALINOS deben presentar una combinación adecuada de características estructurales, de crecimiento y de exfoliación. En este tipo de genes, la información puede almacenarse en una o dos dimensiones. En un gen unidimensional (*arriba*) la información se guardaría en la estructura de detalle de una pila de láminas (*color*), que se mantiene constante (*a, b*) cuando el gen se replica. El crecimiento se registra sólo en las caras coloreadas, y únicamente se produce exfoliación en paralelo a ellas. Las capas que poseen información podrían variar físicamente (por ejemplo, podría haber estructuras cristalinas con alineaciones diferentes), o puede darse también diferencia en la composición química. En genes cristalinos bidimensionales (*abajo*) la información puede almacenarse en forma de patrón (de nuevo de carácter físico o químico) en una cara de cristal (*color*). El esquema permanece constante cuando el gen se replica por crecimiento de la cara coloreada y por exfoliación en un plano paralelo a ella.

ARN es demasiado compleja para considerarla producto originado geoquímicamente en la tierra primitiva. Aun si se demostrara la idoneidad de catalizadores más simples, queda la dificultad adicional de que, para la replicación del ARN, se necesita el aporte de unidades especiales de nucleótidos de elevada energía.

En cualquier caso, la segunda guía contenía una sugerencia muy clara: para la búsqueda del tipo de organización de las primeras formas de vida no conviene recurrir a ninguna simplificación de las actuales. Los primeros organismos, de baja tecnología, debieron ser diferentes y probablemente hechos de otros materiales. En particular, cabe suponer que el diseño estructural de los materiales genéticos que actuaban sin estructuras acompañantes difieriese del diseño presumible una vez que resultara viable la presencia de estructuras acompañantes evolucionadas.

No es difícil imaginar un proceso evolutivo por el que se llegase a remplazar gradualmente el material genético geoquímico con otro alternativo, de tipo orgánico. Llamo "transmutación genética" a tal proceso [*figura 4*].

Si en la evolución inicial del mecanismo básico de control bioquímico se hubieran producido una o más transmutaciones genéticas, no cabe esperar que los componentes del primer material genético se encuentren en el esqueleto molecular básico de los organismos actuales; por cuya razón, la hipótesis de la transmutación puede parecer negativa, como un juego de despistes. Pero también hay un aspecto positivo en la misma: descubre un nuevo campo para la exploración química. La tercera guía dirige nuestra atención hacia el mundo mineral, al tiempo que quedan por abordar consideraciones generales sobre la naturaleza del material genético.

Un cuarto de siglo antes de que se conociese el funcionamiento del ADN, Muller se expresaba así a propósito de su naturaleza: "El material del 'gen' es cualquier sustancia que, en un determinado medio –protoplasmático o de otro tipo–, sea capaz de inducir la producción de su propia composición específica y, aunque puede cambiar repetidamente, 'mutar', conserva la propiedad de autorreproducirse en sus diversas formas".

Sugiérese en su explicación que debe emplearse algún tipo de molde en el proceso de replicación de los genes. Y haremos bien si atendemos a la "composición específica" (información

genética) y vemos en ella el patrón que se copia por medio de la unión y organización de nuevas unidades que están en contacto con dicho esquema (así ocurre en la réplica del ADN o ARN). Aunque el empleo de moldes no es la única forma concebible por la que pueden replicarse patrones complejos mutables, sí parece ser la más fácil y directa.

Pensaremos en un material genético cuyas unidades sean mucho más simples que las del ADN. Verbigracia, unidades que hayan podido ser manufacturadas por la tierra de forma limpia y continua durante mucho tiempo. Y ello sin contar con la ayuda de enzimas complejas; los componentes del primer material genético deberían ser, en mayor o menor grado, autoensamblables.

Vayamos por la cuarta guía:

4. Los genes deben estar formados por un gran número de átomos.

Un conjunto pequeño de átomos nunca podría constituir un gen, ya que éste portará una cantidad de información bastante compleja y será, al mismo tiempo, capaz de evolucionar. Es más, los genes deben ser objetos bien estructurados.

¿Fueron cristales los primeros materiales genéticos? Los cristales son los objetos más comunes de cuantos están dotados de capacidad de autoensamblaje. A menudo se ha trazado un paralelismo entre la cristalización y los procesos vitales fundamentales, para rechazar luego, por limitada, tal analogía entre ambos. (El físico J. D. Bernal fue aún más lejos: "la cristalización es la muerte".)

Barrunto que tras esa objeción hay otro par de "señuelos".

3. Las estructuras cristalinas son monótonas.

4. El carbono es óptimo para la vida.

El tercer señuelo es irrelevante por cuanto hace referencia a los cristales "perfectos", que no existen. Es verdad que un cristal posee una estructura cristalina básica repetitiva. Sin embargo, cualquier cristal real tiene también sobreimpuesta una estructura defectuosa. En el mero hecho de ser finito, de tener tamaño y forma, hay ya un "defecto"; a ello cabe añadir la presencia, siempre, de otras muchas características. Pueden faltar elementos cristalinos o estar remplazados por otros; la continuidad del dibujo cristalino puede alterarse de varias maneras. Estas características pueden darse a muy pequeña escala, lo que confiere a los cristales un gran potencial para contener información.

¿Es posible imaginar algún tipo de estructura defectuosa que se replique durante el crecimiento del cristal? La respuesta es afirmativa. Varios tipos de cristales podrían tener para ello una combinación adecuada de características estructurales, pautas de crecimiento y propiedades de exfoliación.

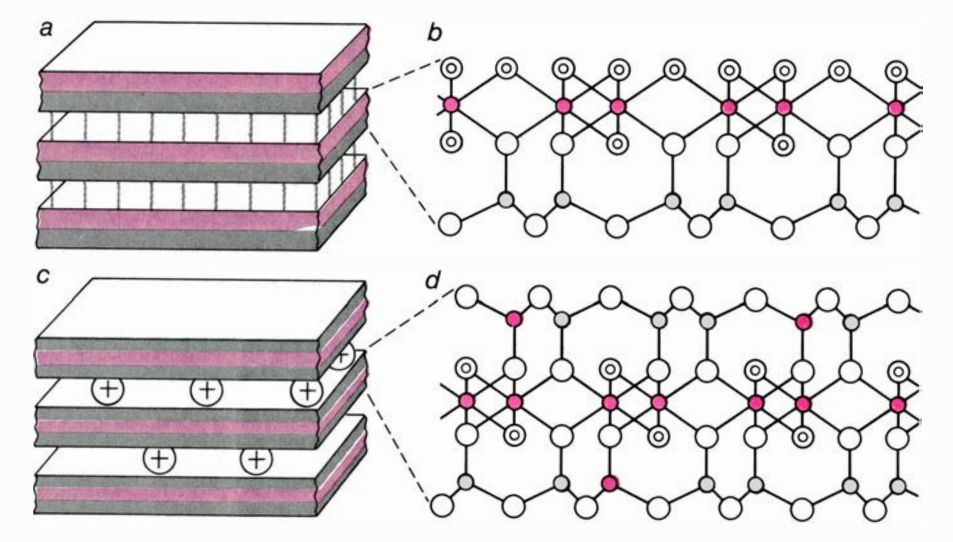
Queda por abordar el cuarto "señuelo". De nuevo el tema no es su veracidad, sino su importancia. Podemos estar de acuerdo en que las moléculas orgánicas son los materiales óptimos para la vida. Sin embargo, cabe esperar que lo óptimo sea el producto de la evolución; al tiempo que también se espera que se comience por lo más sencillo, y la forma más sencilla de autoensamblaje es la cristalización espontánea a partir de unidades simples y abundantes. Lo cual nos lleva a la arcilla.

En todo momento, a nuestro alrededor, se están formando minerales de arcilla por cristalización de disoluciones de ácido silícico e iones metálicos hidratados originadas en la meteorización de rocas duras. A nadie extrañará, pues, que se hable de la superficie de la tierra como de una inmensa fábrica de minerales de arcilla.

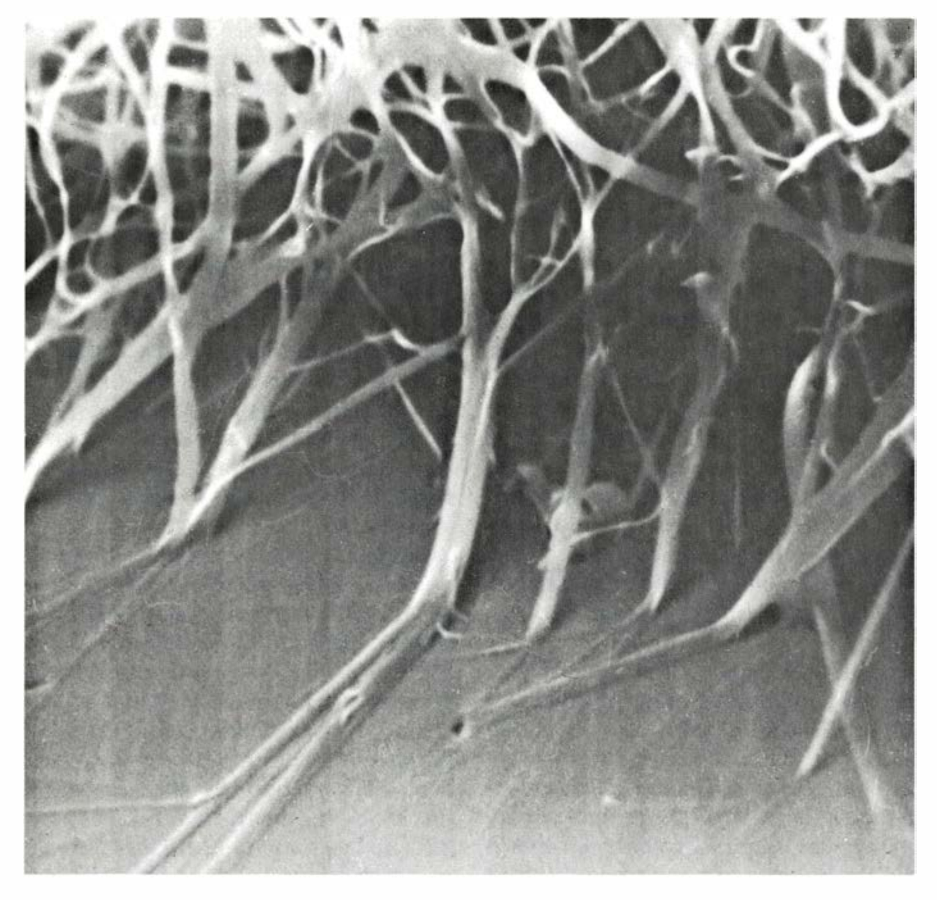
La fábrica se mueve sobre dos grandes ruedas. La primera es el ciclo geológico que obtiene su energía del calentamiento radiactivo del interior de la tierra. Se trata de un conjunto de procesos a través de los cuales los sedimentos se entierran, se transforman a altas temperaturas y presiones a gran profundidad en el interior terrestre, y, a partir de ahí, ya transformados, ascienden de nuevo a la superficie. Tampoco es estable su paso por ésta. Se hallan expuestos a disolverse en agua, disociarse en pequeñas unidades (así ácido silícico y otros iones metálicos) y cristalizar en nuevos materiales: distintos tipos de minerales de arcilla. Antes o después, esos materiales más o menos transformados vuelven a los sedimentos para enterrarse de nuevo. El segundo ciclo corresponde al aporte de agua. Es un ciclo dirigido por el sol: evaporación del agua del mar, formación de nubes, lluvia, aguas subterráneas, arroyos, ríos y de nuevo el mar.

Aunque, naturalmente, la tierra debió ser diferente de la actual cuando la vida apareció sobre ella, según las pruebas disponibles no parece que esa diferencia fuese grande. Entre los materiales más antiguos conocidos se encuentran rocas metamórficas de origen sedimentario, lo que hace pensar que hace 3800 millones de años ya existía un ciclo de meteorización. Es muy posible que la vida sea incluso más antigua que esas rocas. Tal vez tuvo su origen bajo condiciones en las que no se podrían haber formado las arcillas; sin embargo, no hay razón para suponer que así ocurriera.

Entra también dentro de lo posible que los genes primitivos fuesen minerales microcristalinos, diferentes de los filosilicatos ("arcillas") y peor organiza-



7. LA MAYORIA DE LAS ARCILLAS están formadas por superposición de capas. La caolinita (*a*) presenta capas asimétricas unidas por enlaces de hidrógeno. Cada capa está formada por una red de átomos de aluminio y grupos hidroxilo unidos a una red de átomos de silicio y oxígeno (*b*). Otras arcillas tienen capas simétricas, donde la red de silicio-oxígeno se une por dos partes a una red de metal-hidroxilo; estas capas están cargadas negativamente y unidas por iones positivos (*c*). En las illitas (*d*), la mayoría de las cargas negativas provienen de la sustitución de átomos de aluminio por silicio.



8. VARILLAS DE ILLITA fijadas fuertemente a un grano de arenisca. La imagen está aumentada 10.000 veces y la tomó con un microscopio electrónico de barrido W. J. McHardy, del Instituto Macaulay de Edafología, de Aberdeen. Una arcilla de este tipo puede ser un cristal genético unidimensional, si bien con poca capacidad para almacenar información, dado que sólo consta de unas cuantas capas.



9. CAOLINITA VERMIFORME formada por meteorización. La microfotografía, con un aumento de 1350 diámetros, es obra de Keller. Tales cóstulas bien pudieran ser cristales genéticos bidimensionales.

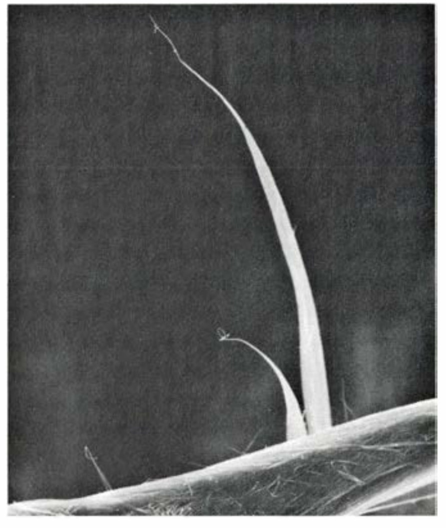
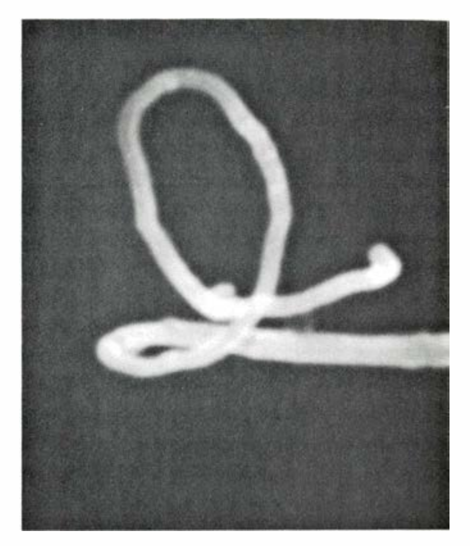
dos. Ello no obstante, en lo que sigue me basaré en los minerales de arcilla normales.

Esta línea de argumentación implica que actualmente, en la tierra, se estaría formando el material genético primitivo, o algo similar a él. ¿Cómo empezar la búsqueda del material genético de arcilla? El conocimiento de las características que comparten distintos tipos de cristales genéticos, unido a lo que sabemos sobre los minerales de la arcilla, nos faculta para avanzar qué rasgos han de definir dicho "mecanismo" y comprobar si existen cristales adecuados.

Consideremos primero un gen de arcilla unidimensional. Las láminas de arcilla se apilan según diversas secuencias. Las capas pueden ser del mismo tipo y presentar diferentes ordenaciones; las secuencias, a su vez, pueden estar formadas por distintos tipos de capas. Si se tiene en cuenta que un cristalito de arcilla, aunque conste de varias capas, puede ser bastante flexible, y que un gen cristalino unidimensional crecería sólo lateralmente, nos encontraremos ante una masa de membranas o láminas plegadas (quizá ramificadas) de grosor constante. Muchas arcillas ofrecen un ordenamiento irregular y se parecen, además, a este esquema.

Hay que admitir que lo anterior es poco sugestivo. (¡Cuán interesante sería, por contra, el gen que transmitiera su mensaje indefinidamente sin dividirse!) Pasemos a otra arcilla de apariencia característica, que valdría de ejemplo de un gen de arcilla bidimensional.

Sturges W. Bailey y C. F. Mansfield, de la Universidad de Wisconsin en Madison, estudiaron, mediante rayos X, grandes cristales de caolinita vermiforme y encontraron una interesante estructura defectuosa. Las capas de caolinita estaban formadas por un mosaico de pequeños dominios que semejaban un pavimento disparatado. En cualquier dominio, todos los átomos de aluminio se ordenaban según tres orientaciones posibles. Una estructura de este tipo puede contener bastante información, y tal información podría reproducirse si la orientación del aluminio en una capa de neoformación viniera siempre determinada por las orientaciones existentes en la capa sobre la que creció. Los cristales perfectos de caolinita mantienen constantes las orientaciones del aluminio en todas las capas; sin embargo, en los cristales reales siempre hay "errores".

10. VARIEDAD DE FORMAS de las arcillas; sugiere que pudieron ser los constituyentes idóneos de los primeros organismos. En una secuencia tomada por Keller al microscopio electrónico de barrido se observa que la halloisita es una masa de fibras, algunas de las cuales son tubos huecos. Una espícula, apenas visible a 130 aumentos (*izquierda*), tiene forma de lazo a 1000 aumentos (*centro*) y aparece como un tubo hueco a 26.000 aumentos (*derecha*).

En cualquier caso, hay señales de un tipo de organización similar en las distintas capas de los cristales vermiformes típicos, algunos de los cuales tienen sección constante a pesar de su complejidad. Ello, y particularmente un surcado profundo, indica una estructura paralela [*véase la figura 8*].

Armin Weiss, de la Universidad de Munich, ha publicado un estudio provisional sobre el crecimiento de cristales de esmectita en el laboratorio. En su opinión, las capas nuevas, que crecen entre las preexistentes, toman información de éstas. Esta información se halla en la densidad de cargas negativas que aparecen a raíz de las sustituciones del aluminio en la red de silicio y oxígeno.

Quedan por realizar otras observaciones y verificaciones experimentales relativas a la cuestión central de la existencia de genes cristalinos. En este momento sólo puedo responder a la misma con un "muy posiblemente", y pasar al siguiente tema: ¿pudieron evolucionar los genes cristalinos? A ello contestaría que "sí, aunque difícilmente".

Sea un microambiente habitual de formación de arcilla: los poros de una arenisca. Los productos disueltos por meteorización percolan a través de la arenisca; en sus poros cristalizan arcillas replicables bidimensionales. Dentro de la arenisca distinguimos zonas rellenas con millones de cristales, que presentan estructuras defectuosas características. En una de ellas puede haber cristales de tamaño y forma tales que se aglutinen para constituir un tapón, que desvíe el movimiento de la disolución; ésta deja de fluir hacia la zona y los cristales interrumpen su crecimiento. En otra parte, la presencia de partículas pequeñas y sueltas permite el paso de la disolución, aunque es fácil que estas partículas se lixivien con la lluvia. Lo que tampoco nos da ningún resultado. En una tercera zona, los cristales pueden adentrarse en oquedades de las paredes de los poros; estos cristales, por un lado, están protegidos y fijos y, por otro, ceden paso a disoluciones con nuevos aportes. Hay otra zona aún donde se forman cristales largos con pequeños entrantes y salientes que permiten que se encajen unos con otros y se forme así una estructura poco apretada; otra manera de fijarse en un sitio correcto sin impedir con ello el paso de disoluciones.

Incluso un ambiente tan elemental como el descrito puede ofrecer sutiles presiones de selección, que determinan que algunas estructuras defectuosas, en este caso determinados tamaños y formas, alcancen mayor éxito que otras. Las mutaciones crearían variantes, con lo que los extremos opuestos de una zona extensa contendrían a menudo cristales con estructuras defectuosas algo diferentes; algunos bordes, por tanto, podrían crecer antes que otros o sobrevivir bajo condiciones adversas periódicas.

Pasemos ahora a otro ambiente más complejo: el de aguas subterráneas con productos de disolución de las areniscas que pasan a una corriente más rápida; aunque demasiado ácida y demasiado diluida para la síntesis de arcilla, esta corriente poseerá uno de los componentes de la arcilla genética bastante escaso en las areniscas. Desde el punto de vista químico, el lugar ideal para el crecimiento de una arcilla genética será la interfase entre dos medios. Aunque no le parecería lo más adecuado a un químico, porque la interfase es estrecha y variable. Cualquier cristal que se forme corre peligro de verse arrastrado, redisuelto o ambas cosas. Sin embargo, la interfase puede estabilizarse y extenderse sobre una masa suficientemente compacta de cristalillos (replicadores) fijados a la arenisca, a manera de engrudo. Las mutaciones que cambian la morfología de los cristales entrelazados que componen esta pasta, alteran su porosidad y, por tanto, el gradiente de acidez y de concentración de otros iones contenidos en su interior. La selección natural podría justificar la capacidad para la síntesis de arcilla dentro de la pasta. La pasta genética con más éxito será una solución de compromiso entre las que constituyan un buen soporte y aquellas otras que proporcionen un medio adecuado para la síntesis de arcilla.

Se dice que la longitud del cuello de la jirafa es obra de la selección natural, para que así se alimente de las hojas de la copa de los árboles sin que se debilite a causa de su longitud. Se podría esperar también que en circunstancias concretas las partículas de arcilla replicadora ajustaran adecuadamente su tamaño y forma. Hay que olvidarse de una fisiología compleja. La lógica es mucho más sencilla. La optimización de las estructuras replicantes y mutantes es difícil y depende de las circunstancias.

Hasta ahora hemos considerado que los primeros tipos de organismos estaban constituidos sólo por genes; nos fundábamos para ello en que inclu-

so el material genético puro puede tener fenotipo, es decir, su eficacia puede depender de propiedades físicas ligadas a la información. En términos más realistas, el material del gen de arcilla puede contaminarse con otras arcillas que crecen bajo las condiciones creadas por los genes de arcilla. Tal material cocristalizado mejoraría sin duda alguna propiedad, como la porosidad de la pasta o su capacidad de fijación. En ese caso se seleccionarían las mutaciones de los genes de arcilla que ayudaran a formar arcillas secundarias adecuadas. Podríamos imaginar una forma especialmente sencilla para que una estructura defectuosa de un cristal genético controlara el crecimiento de otro material: por epitaxia, esto es, a través de arcillas secundarias con estructuras defectuosas específicas que cristalizaran en las superficies de las arcillas genéticas.

Reflexionemos ahora un poco sobre los primeros organismos. Muy brevemente, intentaré esbozar un esquema de la conexión entre ellos y nosotros. La conexión pudo comenzar con la introducción de moléculas orgánicas. Hay un porqué y un cómo.

¿Por qué se introdujeron moléculas orgánicas? Abundan las razones. Algunas moléculas orgánicas pequeñas (por ejemplo aminoácidos y ácidos di- y tricarboxílicos) pueden provocar que los iones metálicos, así el aluminio, sean más solubles. De esta forma podrían actuar de catalizadores en la síntesis de arcillas. Otros tipos (como las bases heterocíclicas y los polifosfatos) resultan particularmente adecuados para aglutinar arcillas, y con frecuencia alteran las propiedades físicas de la pasta arcillosa. Las moléculas orgánicas influyen también en el tamaño y la morfología de los cristales inorgánicos por inhibición del crecimiento de ciertas caras. Ello pudo tener gran importancia en la réplica controlada de genes cristalinos. De nuevo, los polímeros orgánicos pudieron tener efectos estructurales, como el de aglutinar las partículas de arcilla.

Me atrevería a apostar porque los precursores del ARN que debieron aparecer en los organismos de arcilla más evolucionados habrían servido de primeros materiales estructurales (el ARN aún se usa así). Un polímero de tipo ARN, con su red axial cargada negativamente, tenderá a unirse a los bordes de las partículas de arcilla (que a menudo tienen carga positiva). Por el contrario, las bases heterocíclicas (la adenina entre ellas) tienden a fijarse entre las capas de las arcillas. Es posible imaginar que un polímero de tipo ARN evolucionase específicamente para reaccionar con las arcillas (quizás incluso para "leer" la información contenida en los bordes de un gen de arcilla unidimensional).

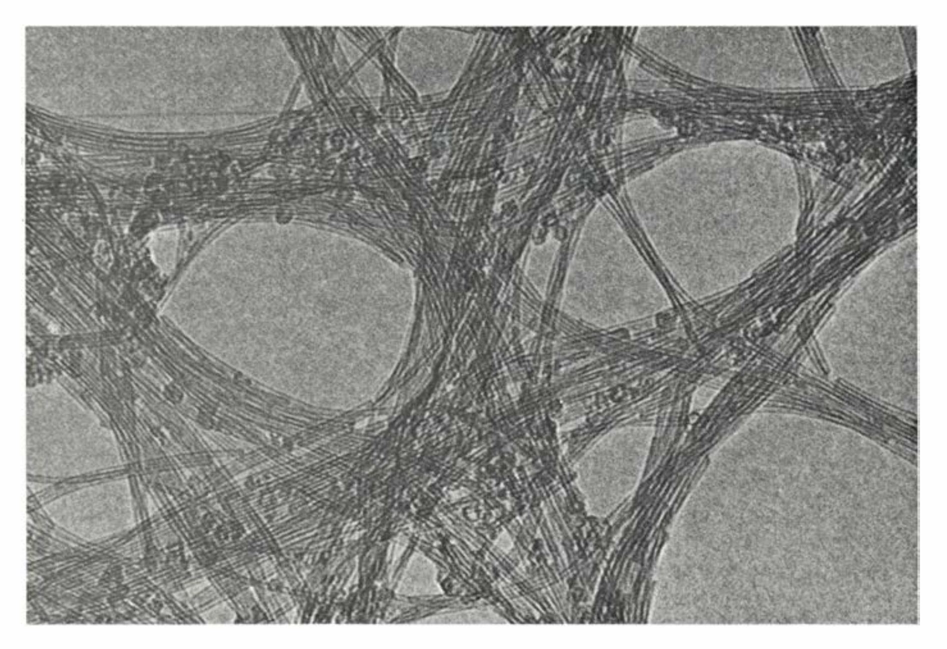
La transmutación que dio origen al mecanismo de control boquímico actual comenzaría, de acuerdo con esta hipótesis, cuando el ARN se convirtiera en molécula replicadora –un tipo nuevo de material genético colaborador con escaso papel, al menos inicialmente. Un largo camino precedería al desmontaje del "andamiaje" de arcillas, y es posible que ello no ocurriera hasta después de la aparición de un elaborado mecanismo de síntesis eficaz de proteínas. Sin embargo, el desarrollo de tal mecanismo entra dentro de lo concebible en el contexto de un organismo ya evolucionado. El mecanismo evolucionaría como un subsistema: en principio a modo de "opción" que adquiriría, luego, mayor complejidad y eficacia; y, al desaparecer el andamiaje, constituiría una necesidad.

¿Por qué habría de abandonar la evolución lo inorgánico y cristalino en favor de lo orgánico y molecular? Porque las estructuras orgánicas (una vez conseguida la tecnología adecuada) pueden construirse mucho más delicadamente y se alcanza con ellas un mayor control.

¿Cómo se introdujeron las moléculas orgánicas? Me inclino por la fotosíntesis, que aprovecharía dióxido de carbono atmosférico para formar, en un comienzo, ácido fórmico y otras moléculas parecidas.

Pero el problema central es averiguar cómo pudieron emplearse moléculas algo más complejas, antes de que hubiera enzimas. ¿Cómo surgieron los nucleótidos? Tuvieron que hacerlo por procedimientos de manufactura: debió producirse una secuencia adecuada de muchas reacciones químicas y de otros procesos, verbigracia, purificaciones. Cosas de ese calibre no ocurren porque sí, deben estar organizadas. En los organismos de arcilla evolucionados, el organizador pudo ser la selección natural. ¿De qué mecanismos físicos se valdrían antes de haber proteínas? Antes de que existieran enzimas, los organismos recurrirían a algún mecanismo más antiguo; un aparato más parecido a lo que se halla hoy en los laboratorios de química orgánica o de las plantas industriales. En éstos, junto a contenedores, tubos, bombas, filtros, intercambiadores iónicos y columnas de absorción, encontramos catalizadores un tanto inespecíficos.

Y ello lleva a la parte final del tema: los minerales de arcilla en cuanto materiales principales de los primeros organismos. Si nos interesan catalizadores (bastante inespecíficos), los encontraremos fácilmente entre los minerales de arcilla. En concreto, si precisamos aparatos simples, como los descritos, infinidad de arcillas normales parecen inclinadas a formar ese tipo de cosas. Harina de otro costal es cómo lograron



11. IMOGOLITA Y ALOFANA aumentadas 500.000 veces en una microfotografía de Naganori Yoshinaga. Las estructuras delgadas y largas son tubos de imogolita unidos por vainas huecas de alófana.

unirse y bajo qué presiones selectivas lo hicieron. Con todo, no es éste precisamente el tipo más adecuado de material que cabe imaginar.

Tres preguntas escépticas:

¿Por qué no estamos rodeados por doquier de genes cristalinos, siendo así que están compuestos de materia común y difícilmente podríamos impedir su evolución?

Se me ocurren cuatro respuestas: (1) Quizás existan tales genes cristalinos. (2) El material genético mineral es cosa rara. (3) Las condiciones favorables para la réplica de genes minerales son raras. (4) Los genes minerales evolucionados son frecuentes pero irreconocibles. Que el lector escoja la respuesta que más le satisfaga.

En cualquier caso, no me cabe imaginar que los organismos de arcilla actuales pudieran de nuevo utilizar moléculas orgánicas. La competencia con los organismos dotados de ADN sería feroz. Lo mismo resultaría aplicable a las formas primitivas que, en ningún caso, parece que puedan existir hoy en día.

¿Atendiendo a qué puede afirmarse que hay vida en pequeños cristales de arcilla?

Los primeros organismos debieron ser insignificantes, y no estarían vivos. Es necesario que existan organismos, como prerrequisito para la evolución, pero la "vida" es algo más. Es un concepto un tanto vago, un hecho singular, una complejidad aparentemente intencionada que gradualmente aparecería como producto de la evolución. Sin embargo, creo que, en cualquier caso, los organismos primitivos posteriores debieron estar vivos.

¿Qué experimentos hay que realizar?

La interfase entre la arcilla y las moléculas orgánicas constituye un objeto prioritario de investigación; en gran parte, ésta se realiza en el Centro de Investigación Ames de la NASA, próximo a Mountain View, California. James G. Lawless y sus colaboradores han puesto de manifiesto que iones metálicos como el zinc y el cobre pueden intervenir en el enlace entre nucleótidos y arcillas. También han encontrado que los iones de las arcillas ejercen efectos catalíticos selectivos sobre los aminoácidos. Trabajando en Ames, Max M. Mortland, de la Universidad estatal de Michigan, encontró que el coenzima ridoxal fosfato desempeñaba funciones de carácter enzimático si se combinaba con arcillas de montmorillonita con cobre. Noan Lahav, de la Universidad Hebrea, junto con David White, de la Universidad de Santa Clara, y Sherwood Chang, de Ames, comprobaron que las arcillas sujetas a un ciclo de humificación y secado llegan a fijar moléculas del aminoácido glicina. Tal ciclo transfiere energía del medio a las moléculas orgánicas.

Un mecanismo de transmisión energética hubo de constituir parte imprescindible de cualquier organismo, incluso de los más elementales. Lelia M. Coyne, de la Universidad de California en San José, ha encontrado que la caolinita pudo servir a ese fin. Puede tomar energía del medio (a partir de procesos radiactivos) y almacenarla, para cederla cuando la arcilla se altera, por ejemplo al humedecerse o secarse.

Con el ánimo de conocer mejor la interfase arcilla-molécula orgánica, Lawless, Chang y sus colegas han estudiado meteoritos que contienen carbono, de edad parecida a la del sistema solar, que informan de lo que fue la química orgánica en los inicios de la historia de la tierra. Sorprende que en esos meteoritos coexistan arcillas y moléculas orgánicas. La superficie de Marte quizás arroje algo de luz sobre las condiciones iniciales de la Tierra. Amos Banin, de la Universidad Hebrea, propone que la superficie de Marte estaría formada en buena parte por montmorillonita rica en hierro. Ello explicaría el resultado de un experimento realizado por la nave *Viking*: se transformó monóxido y dióxido de carbono en moléculas orgánicas (de las que el ácido fórmico probablemente fuera el componente principal) en presencia de luz ultravioleta. Jerry Hubbard, del Instituto de Tecnología de Georgia, ha verificado experimentalmente que los minerales de hierro, arcillas incluidas, producen efectos equivalentes.

En la actualidad, el reto más importante lo plantea el descubrimiento de genes cristalinos de diferentes tipos, y no sólo de materia mineral. Imaginemos que se experimenta con cristales capaces de evolucionar y, para conocer su reacción, se les enfrenta a diversas presiones de selección. En cualquier caso, interesaría realizar los experimentos con independencia de la composición de los cristales. Pronto descubriríamos si resultan factibles las versiones minerales de sistemas capaces de replicarse. Sin duda perderíamos interés por nuestros primeros ancestros si llegáramos a tener en nuestras manos otro tipo de primer organismo: nuestro primer organismo artificial.

Ecología social de los chimpancés

Raramente se han estudiado los chimpancés en libertad sin ofrecerles comida, práctica que distorsiona sus relaciones sociales. Un estudio de estos simios sin abastecerlos muestra que únicamente el hombre comparte su estructura social

Michael P. Ghiglieri

De todas las especies de mamífero estudiadas con detalle, la de los chimpancés posee una estructura social única. Cada comunidad, formada por 50 o más miembros, ocupa un territorio del que se excluye a otros chimpancés macho. En el interior de su territorio, los miembros de la comunidad se hallan en constante movimiento, a la búsqueda de árboles frutales y de otras fuentes de alimento. Cuando la fruta se encuentra dispersa, los miembros de la comunidad pueden optar por abandonar el grupo y lanzarse a la búsqueda de comida por su cuenta. Cuando la fruta abunda, los simios tienden a congregarse en grandes bandas para comer, aparearse, acicalarse unos a otros y descansar. Esta forma de organización de "fusión-fisión", en la que la comunidad está continuamente fragmentándose y reagrupándose, es rara en los animales sociales.

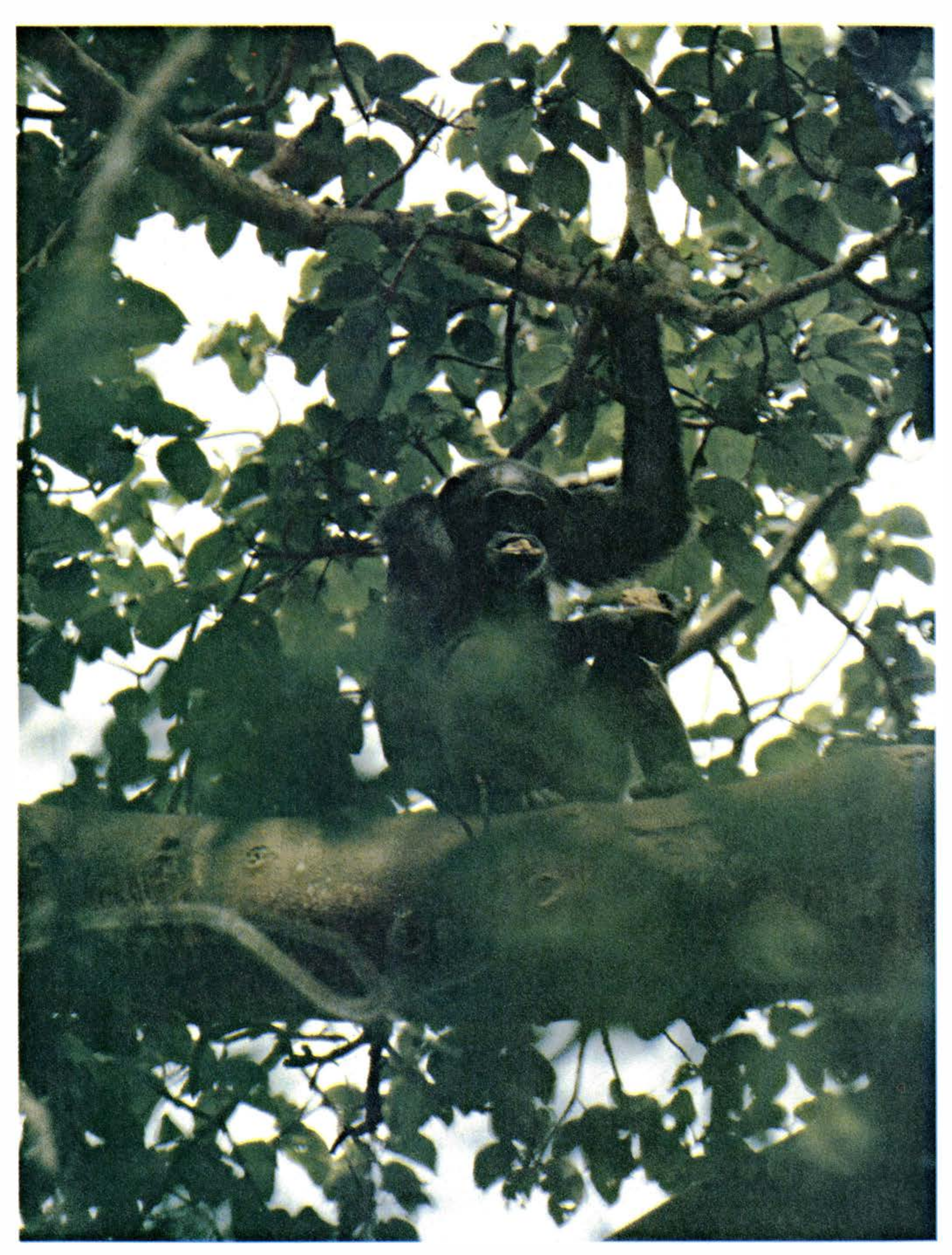
Otra característica de la comunidad de chimpancés resulta todavía más peculiar: la exogamia femenina, es decir, el apareamiento de las hembras fuera del grupo familiar. Cuando las hembras alcanzan la madurez sexual, emigran al territorio de una nueva comunidad para aparearse. En cambio, los machos permanecen toda su vida en el territorio donde nacieron. Al final pasan a formar parte del colectivo de machos que rondan por las fronteras del territorio y engendran la siguiente generación de la comunidad. La exogamia de las hembras produce una división genética entre los machos y las hembras de la comunidad; los machos están estrechamente emparentados desde el punto de vista genético, mientras que las hembras pueden o no estar emparentadas entre sí.

La distinción, en el interior de una comunidad, entre un grupo de machos estrechamente emparentados y un grupo de hembras no emparentadas reviste especial interés para entender la historia evolutiva de los chimpancés y también la de los seres humanos. Entre los animales salvajes, sólo los chimpancés exhiben la combinación de una sociedad de fusión-fisión, territorialidad y exogamia femenina. Sin embargo, los estudios antropológicos sugieren que tal forma de organización es típica de las sociedades humanas en su fase cazadora-recolectora. Los chimpancés son los parientes vivos más cercanos a los seres humanos: el ADN de las dos especies difiere sólo en un 1,2 por ciento. Así, los seres humanos y los chimpancés no sólo son parientes genéticos próximos, sino que comparten además una estructura social única. Comprender las fuerzas evolutivas que conformaron la comunidad de los chimpancés puede esclarecer la evolución de las sociedades humanas cazadoras-recolectoras.

Se ha invertido mucho tiempo y esfuerzo en desentrañar el comportamiento de los chimpancés. Sin embargo, sólo recientemente estudios de campo llevados a cabo por el autor y otros investigadores han proporcionado observaciones detalladas de la estructura social de esas comunidades en la naturaleza. Una de las razones por las que la información se ha acumulado lentamente es que los chimpancés en libertad son tímidos y esquivos. Cuando detectan la presencia de un ser humano, desaparecen. Para vencer la timidez de los monos, la mayoría de los estudios anteriores recurrían a ofrecer alimento a los animales, generalmente caña de azúcar o plátanos. Dos notables estudios a largo plazo realizados en la costa oriental del lago Tanganika empleaban esa estrategia del abastecimiento. Jane Goodall y sus colegas llevaron a cabo su investigación en el Parque Nacional de Gombe; Toshisada Nishida, de la Universidad de Tokio, y sus colegas realizaron la suya en las montañas de Mahale. Ambos estudios se han desarrollado de forma continuada durante 20 años. A lo largo de ese tiempo han proporcionado numerosas observaciones decisivas sobre el comportamiento de los chimpancés, así como sorprendentes sugerencias con respecto a su estructura y evolución sociales.

Por desgracia, sus resultados no ofrecen un conocimiento completo de la organización social de los chimpancés. Aunque dar alimento abundante a esos antropoides facilita su estudio, se sabe que con ello se distorsionan sus pautas sociales y ecológicas normales. Como veremos, tales distorsiones no carecen de interés. Aun así, el conocimiento de la comunidad en su estado no perturbado depende de trabajos que no se apoyen en el suministro de alimento. El deseo de observar una banda no perturbada me llevó a la Reserva del Bosque de Kibale, Uganda occidental, para un estudio de dos años, en el cual acostumbré a los simios a mi presencia mediante mi aparición repetida en lugares donde encontraban, de modo natural, su fuente de alimento.

El bloque central de la Reserva del Bosque de Kibale apenas ha sufrido la injerencia humana; constituía, pues, un excelente lugar para el estudio de *Pan troglodytes schweinfurthii*, la subespecie oriental, de pelo largo, de chimpancé. Mi zona de observación era Ngogo, el centro de la reserva natural del bosque. En 1977, Thomas T. Struhsaker y William J. Freeland, de la Sociedad Zoológica de Nueva York, iniciaron un estudio de los monos de Ngogo: colobos rojos, guenones de cola roja y mangabeys crestados. Construyeron un retículo rectilíneo de pistas para observar a los monos y registrar la distancia que recorrían en una zona de unos seis kilómetros cuadrados. El sistema de retículo resultó ser un instrumento muy valioso para realizar una investigación cuantitativa de los chimpancés de Ngogo. Utilicé el retículo y lo extendí hasta donde fue preciso para observar

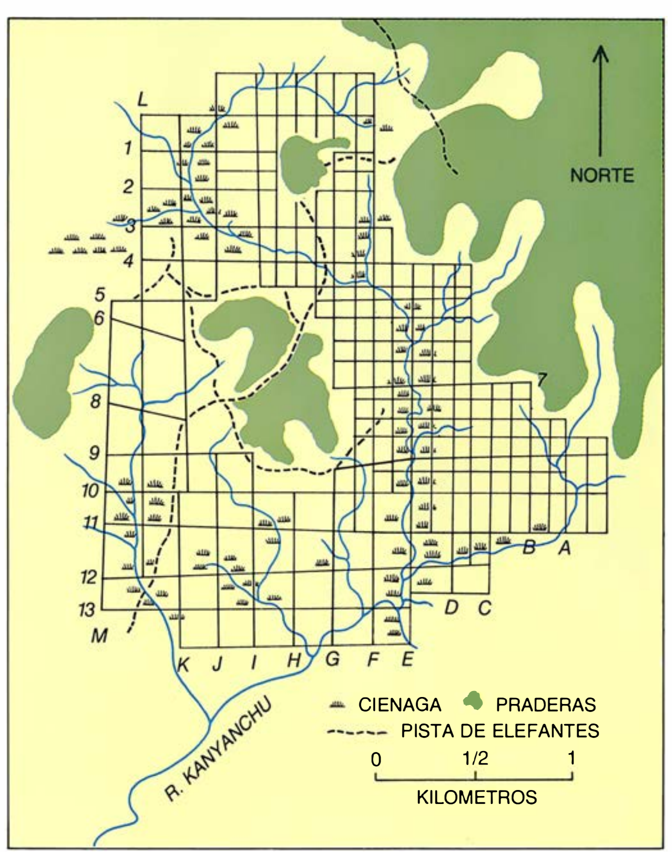


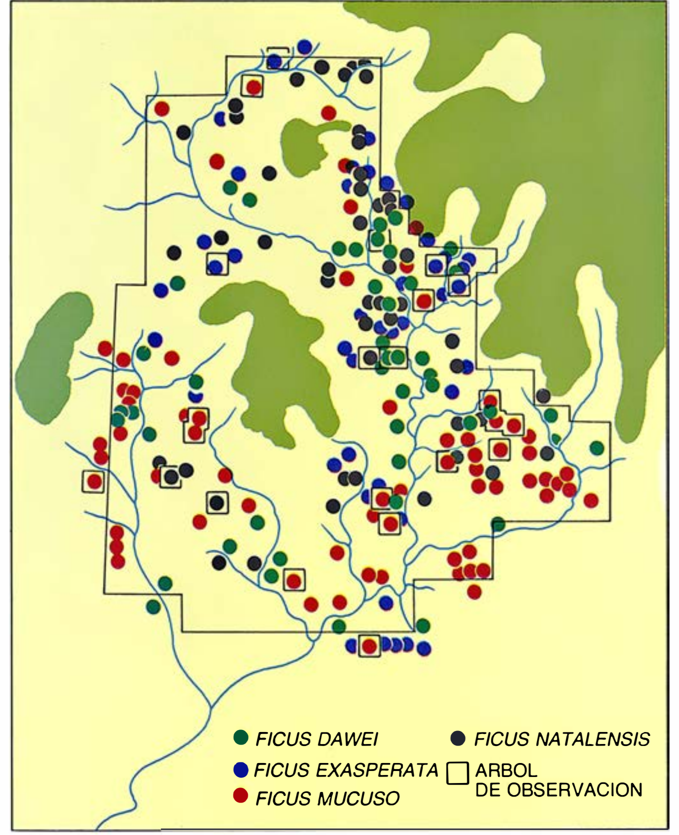
1. CHIMPANCE COMIENDO en un árbol del género *Ficus*. Los higos de ese género de árboles constituyen uno de los alimentos preferidos por los chimpancés de la pluviselva ecuatorial. Pasan más de la mitad de sus horas de vigilia recolectando comida; a veces comen solos, como éste, pero en un mismo árbol pueden reunirse grupos de 20 animales o más. La estructura insólita de la comunidad de los chimpancés, que permite variar el tamaño del grupo, constituye una evolución adaptativa que maximiza la eficacia de la búsqueda de fruta. La fotografía fue tomada por Constance S. Ghiglieri en el bosque de Kibale, Uganda sudoccidental, en el transcurso del estudio de chimpancés en estado natural realizado por el autor a lo largo de dos años.

las actividades diarias de la comunidad de Ngogo, que contaba con unos 55 individuos.

Para comprender la ecología social de un grupo animal es necesario identificar la base de recursos del mismo y observar cómo se las arregla para explotar tales recursos. En el caso de los chimpancés, el recurso primario es la fruta: en Ngogo los monos dedican el 78 por ciento de su tiempo de alimentación a consumir frutos o semillas. Esta proporción concuerda con lo que los observadores han señalado en otros hábitats, aunque el porcentaje varía y puede ser mucho más bajo en hábitats marginales. Los chimpancés salvajes comen asimismo insectos y cazan mamíferos, monos entre ellos. Además, consumen gran variedad de alimentos vegetales: corteza, médula, capullos y hojas tiernas. Pero el alimento más apreciado es la fruta. En Ngogo los chimpancés se alimentan de decenas de especies de árboles frutales, y prefieren en particular varias especies del género *Ficus*, que producen higos ricos en proteínas.

La explotación de frutos como dieta básica conlleva limitaciones a la estructura social; tales limitaciones proceden de la distribución desigual de los frutos, tanto en el tiempo como en el espacio. Más de 100 especies de árboles pueden crecer en los 10 a 30 kilómetros cuadrados que constituyen el territorio de una comunidad de chimpancés. Sin embargo, de las 100 especies quizá sólo la cuarta parte proporcionen frutos comestibles. El análisis de la distribución de las 12 especies alimentarias más importantes demostró que los monos dependen de especies raras, que tienden a crecer en grupos, y no a distribuirse uniformemente. Además, descubrir esos pequeños grupos no garantiza una pitanza. Los árboles tropicales raramente fructifican siguiendo un calendario anual regular. Algunos árboles lo hacen a intervalos impredecibles. Otros, entre los que se cuentan varias especies de *Ficus*, presentan dos períodos de fructificación al año, según un





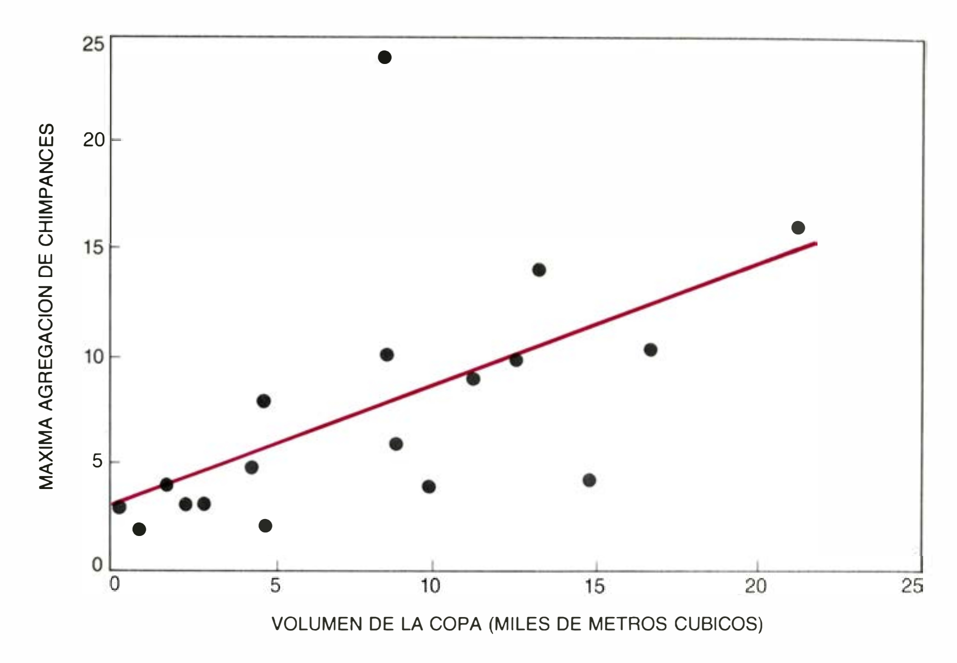


2. BOSQUE DE KIBALE, situado en el cinturón de pluviselva ecuatorial de Africa oriental (*izquierda*). Varios estudios de chimpancés a largo plazo, entre los cuales figura el famoso de Jane Goodall, se han realizado en la costa oriental del lago Tanganica. El autor realizó su estudio en un sector del bosque de Kibale denominado Ngogo, donde vivía una comunidad de unos 55 chimpancés. En su observación se sirvió de un retículo rectilíneo de pistas (*arriba, izquierda*). En Ngogo crecen trece especies de *Ficus*; de ellas, las cuatro principales tienden a concentrarse en grupos (*arriba, derecha*). Los árboles encerrados en cuadrados son "árboles de vigilancia", desde los que se observaba el comportamiento de alimentación de los antropoides a lo largo de períodos prolongados. La distribución desigual de los árboles frutales de la pluviselva y el calendario irregular de su fructificación se traducen en una gran fluctuación de la cantidad de fruta disponible, lo que a su vez incide de manera notable en la organización social del chimpancé.

calendario irregular. Dentro del territorio de una comunidad, los frutos maduros de los árboles de una determinada especie aparecen y desaparecen en cuestión de días. El volumen total de fruta comestible puede variar en un factor de ocho entre la estación húmeda y la seca.

Los chimpancés no son los únicos animales que buscan en la bóveda forestal tan efímeros productos. En Ngogo, durante las horas diurnas, los veía porfiar con frecuencia con aves frugívoras o monos. La competencia librada con las siete especies de monos resultaba particularmente intensa. Según mis censos, los monos, en conjunto, superan en número a los chimpancés en la proporción de 200 a uno. Ninguna de las siete especies tiene una dieta que incluya una proporción tan elevada de fruta como la de los antropoides, pero todos los monos compiten en algún grado con los chimpancés. Durante tales enfrentamientos, los antropoides solían desalojar a todos los monos, excepto a los colobos rojos. Un ataque decretado por los machos de una banda grande de colobos rojos solía poner en fuga a una de chimpancés de un árbol frutal favorecido. Parte del éxito de los monos se debe a que son trepadores mucho más ágiles que los chimpancés. Se ha visto a los machos de éstos sufrir heridas graves, o morir, por caídas desde la bóveda de la pluviselva. No sorprende, por tanto, que en las alturas de los árboles la mayoría de los antropoides se bata en retirada ante el agresivo colobo. Sin embargo, sobre el suelo o en el follaje bajo, los chimpancés macho cazan y matan a los colobos rojos, así como a otras especies de monos.

El sistema de vida del chimpancé se basa, por tanto, en encontrar un alimento, raro y que desaparece pronto, antes de que lo hagan sus competidores. Desde esta perspectiva, resulta algo sorprendente que los chimpancés sobrevivan. Sin embargo, la adaptación evolutiva los ha dotado adecuadamente para la supervivencia, tanto individual como colectivamente. Una de las principales ventajas del chimpancé es su inteligencia. Pruebas de laboratorio con animales cautivos han demostrado que si la recompensa es el alimento, los chimpancés son capaces de considerables proezas mentales: aprendizaje de tareas basado en el discernimiento, en principios de aritmética y en la discriminación; comunicación simbólica; planteamiento eficaz de un itinerario de recolección de alimento y capacidad



3. TAMAÑO DEL GRUPO DE ALIMENTACION; está influido por la cantidad de fruta que dé el árbol. El volumen de la copa (*eje horizontal*), o volumen definido por el follaje, se supone proporcional a la cantidad de fruta. A medida que crece la copa, también lo hace el número máximo de antropoides observados alimentándose en el árbol (*eje vertical*). La capacidad de los chimpancés para desplazarse en grupos que varían de tamaño entre uno y veinte o más animales permite a los simios mantener lazos sociales al tiempo que se especializan en frutos que pueden encontrarse ampliamente distribuidos.

de comunicar la localización de comida escondida a otros chimpancés.

Entre los componentes de la inteligencia, el excelente sentido que los chimpancés tienen de las relaciones espaciales y la buena memoria para esas relaciones revisten particular importancia en la recolección de alimento. Richard W. Wrangham, de la Universidad de Wisconsin, que los estudió en Gombe, llegó a la conclusión de que los antropoides de allí eran "buenos botánicos", que podían escoger una especie vegetal en fruto de entre todas las plantas circundantes y luego localizar cada una de las plantas de aquella especie a la busca de fruta madura. Los chimpancés aventajan a los monos inferiores en todas las pruebas de inteligencia, y sin duda son mejores que éstos a la hora de hallar frutas en la naturaleza. Además, se desplazan por el suelo, modo de locomoción más eficaz que trepar por la bóveda arbórea, como hacen los monos. Su mayor movilidad les permite cubrir más superficie en busca de alimento que la que pueden abarcar los monos.

Las capacidades físicas y mentales del chimpancé le facultan para no ceder frente a los monos y a otros animales frugívoros. La flexibilidad de la sociedad de fusión-fisión es asimismo crucial para el éxito de esta competencia. Ningún árbol frutal único podría subvenir las necesidades alimentarias de la comunidad de Ngogo, de unos 55 simios; es raro que incluso un grupo de árboles baste a toda la comunidad. De ahí que los chimpancés deban buscar el alimento en subgrupos más reducidos. A medida que el tamaño del grupo recolector aumenta, el número de árboles que deben visitarse para satisfacer el hambre de todos sus miembros aumenta proporcionalmente. Un número de árboles con frutos suficientes para que tres adultos coman durante una hora puede acomodar a 30 adultos sólo durante seis minutos. De forma que el grupo de 30 tiene que desplazarse 10 veces más lejos que el grupo de tres para satisfacer sus requerimientos nutritivos. Tal aumento de los desplazamientos no sólo elevaría las exigencias metabólicas de cada simio, sino que también aumentaría el tiempo que el animal pasa moviéndose, desde el normal 10 a 12 por ciento de las horas de luz diurna hasta un 100 por ciento o más, ocupando así todo el tiempo disponible.

Los chimpancés que se desplazan en busca de alimento lo hacen en bandas bastante restringidas. Tras muchas horas de vigilancia en Ngogo deduje que el grupo medio de alimentación constaba de 3,6 miembros. Los grupos no eran en absoluto uniformes: con frecuencia observé antropoides solitarios, así como agregaciones alimentarias mayores, que constaban de hasta 24 miembros. Con la intención de identificar los factores que influyen sobre el tamaño del grupo medí el volumen de la

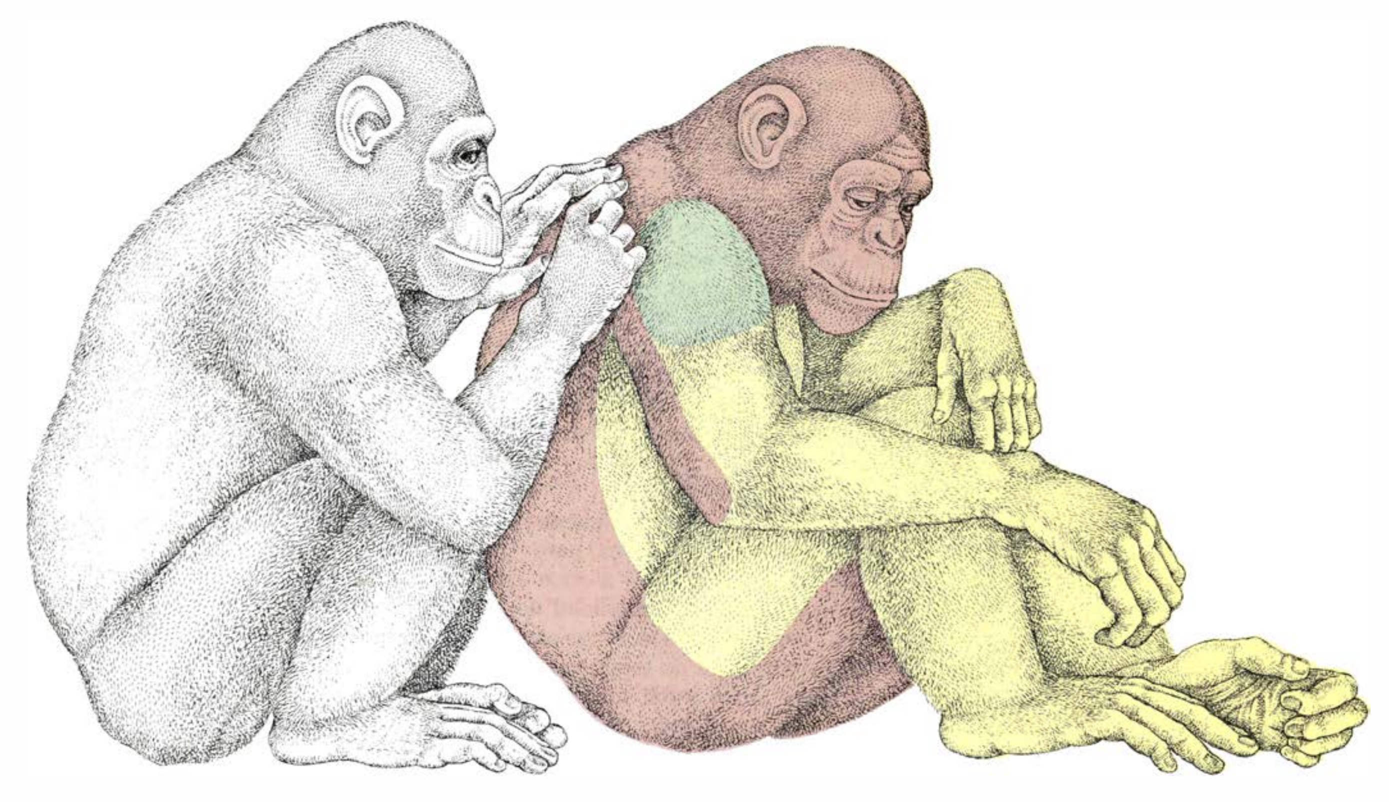
copa (la región redondeada definida por las hojas y los frutos) de varios árboles frutales. Relacioné, luego, las visitas realizadas por los chimpancés a árboles con un determinado volumen de copa. Los árboles grandes, que tienen más fruta, atraen a más chimpancés y éstos permanecen en ellos más tiempo que el que pasan en los árboles pequeños. Repiten más a menudo las visitas a los árboles grandes, que son, también, sometidos a un escudriñamiento más intenso.

Estas pautas pueden parecer obvias; diríase incluso que son afirmaciones de Pero Grullo: más frutos atraen a más simios, que comen juntos; sin embargo, contrastan sorprendentemente con el comportamiento del orangután, el primo frugívoro del chimpancé. Las dos especies están estrechamente emparentadas: su ADN difiere sólo en un 2,2 por ciento. Además, su ecología alimentaria y su hábitat son similares, y las hembras de ambas especies llegan a alcanzar casi el mismo tamaño. Pero los chimpancés y los orangutanes difieren mucho en su estructura social. Una razón de ello debemos buscarla en el grado de especialización anatómica del orangután para trepar por los árboles: tienen, literalmente, cuatro manos, y los huesos de todos los dedos están curvados para ayudar a agarrar las ramas. Sobre el suelo cierran sus pies quiriformes, formando torpes muñones, inadecuados para desplazarse a grandes distancias. Un grupo de orangutanes difícilmente podría desplazarse a suficientes árboles para alimentarse, lo que explica la vida solitaria que llevan. El macho adulto, imponente, ocupa una zona vital, que se superpone a las zonas de dos o más hembras. El macho repele a los rivales con llamadas prolongadas o lucha con ellos para conservar el derecho exclusivo a aparearse con las hembras de su zona vital.

La estructura social del orangután constituye un modelo básico que comparten muchas otras especies de mamíferos. En cambio, la de los chimpancés es única. No cabe duda de que la diferencia entre chimpancés y orangutanes en la anatomía de manos y pies guarda relación con la disparidad de organización social. Las diferencias anatómicas se ven reforzadas por diferencias psicológicas. Cuando a los chimpancés se les presenta la oportunidad de un contacto social, no lo desaprovechan. Se señaló antes que el abastecimiento que realizaron Goodall y sus colegas en Gombe distorsionó el comportamiento social de los chimpancés. En concreto, eliminar las limitaciones alimentarias normales mediante el suministro de alimento abundante a los simios se tradujo en un aumento del tamaño medio del grupo. Yo mismo comprobé en Ngogo que las interacciones amistosas entre chimpancés eran más frecuentes que las enemistosas en un factor de 10.

Ambas observaciones muestran que los chimpancés gustan de la compañía de otros chimpancés. En condiciones normales, la eficacia de la alimentación obliga a menudo a reducir el tamaño de los grupos. La sociedad de fusión-fisión constituye una adaptación individual que le permite al sujeto mantener lazos sociales sin sacrificar esa eficacia. En contraste con la mayoría de los demás primates que viven en grupo, a los chimpancés adultos les cabe siempre la opción de separarse de su banda para alimentarse solos o con otro grupo de alimentación. La fisión reduce la competencia en tiempos de escasez. A lo largo de la evolución, los chimpancés que podían escindirse de grupos grandes y alimentarse de recursos escasos sin perder sus lazos con la comunidad tuvieron una ventaja nutritiva sobre los que se mantenían en grandes grupos cuando el alimento era inadecuado. Una abundancia de comida invierte la fisión y produce fusión: en tiempos de abundancia en Ngogo, los chimpancés se reunían en grupos bastante grandes para alimentarse, desplazarse e interactuar socialmente.

Si los chimpancés se las apañan bien por sí mismos en pequeñas bandas, ¿por qué habrían de unirse a otros miembros de su comunidad? Las teorías de la evolución en boga mantienen que la selección natural opera a través del individuo y no a través del grupo o de la especie. Al explotar todas las oportunidades reproductoras, un individuo maximiza el número de copias de sus genes que aparecerán en generaciones subsiguientes. La explotación del mayor número de oportunidades repro-



ductoras depende de una nutrición superior y del acceso a los adultos del sexo opuesto. La estrategia reproductora de los machos de la mayoría de especies de mamíferos se basa en defender el alimento y excluir a otros de las hembras que se hallan en estro. Pero los chimpancés macho hacen, en la naturaleza, exactamente lo contrario: los machos de Ngogo exhibían un comportamiento cooperativo tanto en la alimentación como en el apareamiento.

Uno de los más sorprendentes ejemplos de comportamiento cooperativo en los chimpancés macho lo constituyen las señales vocales denominadas suspiros ululantes, que comprenden sonidos estereotipados: chillidos, gritos, gemidos y rugidos, audibles hasta a dos kilómetros de distancia por la pluviselva. Puede emitirlos un simio solitario o un grupo de chimpancés a coro. Los chimpancés de Ngogo ululaban más cuando se desplazaban, se acercaban a una fuente de alimento, distinguían a otros chimpancés o respondían a las llamadas de otro grupo. Más de la mitad de esos gritos registrados en Ngogo formaban parte de un intercambio con otros antropoides. Peter Marler y Linda Hobbett, de la Universidad Rockefeller, analizaron sonogramas de suspiros ululantes y encontraron suficientes señales en cada llamada para distinguir a los individuos que los emitían; vale decir, cuando un grupo lanza sus gritos a través de la selva, comunica la identidad de los miembros del grupo, su número y localización.

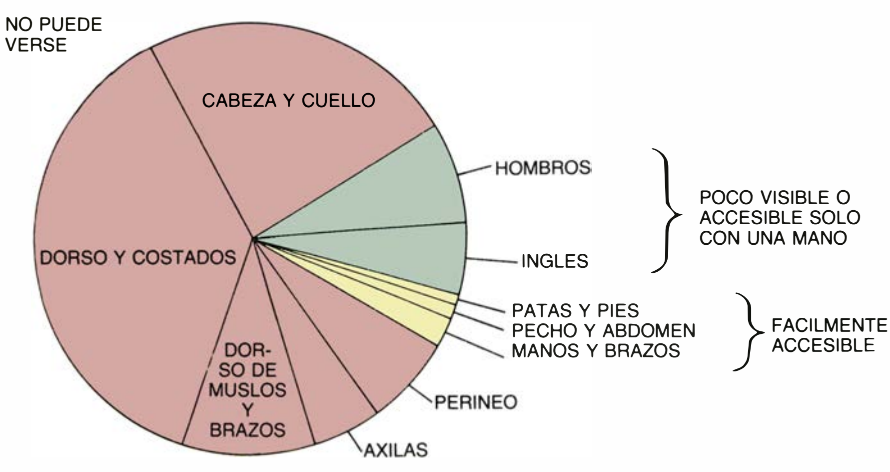
La función más interesante del suspiro ululante es alertar a otros miembros de la comunidad de la presencia de fruta. Aproximadamente la cuarta parte de las veces que un grupo llegaba a un árbol frutal grande ululaban uno o varios. Su llamada producía a veces una barahúnda impresionante, que duraba por lo menos 10 minutos. Al cabo de muchas llamadas otros chimpancés aparecían en el árbol y recolectaban los frutos. Con el ánimo de esclarecer si el efecto era significativo reuní todos los datos de que disponía sobre llegada de segundos grupos a los árboles con comida. Los datos demostraron que las llegadas subsiguientes ocurrían significativamente más a menudo si los machos del primer grupo ululaban al llegar al árbol. Las llamadas que avisaban de la existencia de comida atraían a machos y a hembras; los recién llegados compartían la fruta con los que la habían encontrado.

El comportamiento no competitivo en los chimpancés macho se extiende incluso a la reproducción. A diferencia de los orangutanes, los machos de una comunidad de chimpancés invierten poco tiempo en intentar excluirse los unos a los otros de las oportunidades de apareamiento. Es común que los machos de un grupo ignoren a otro que esté copulando a sólo unos metros de distancia. Más aún, una hembra copula con frecuencia con varios miembros del mismo grupo en rápida sucesión. Sin embargo, observaciones más recientes, en Gombe, sugieren que no siempre los chimpancés hembra son promiscuos, ni los machos tan tolerantes. Un macho dominante puede a veces excluir a sus rivales llevándose a la hembra "de safari" con el ánimo de reproducirse exclusivamente con ella. En el bosque de Kibale, un macho intentaba a veces afirmar su dominancia y excluía a otros de alguna hembra en estro. Sin embargo, si una hembra en estro se ofrecía a un macho subordinado para copular, los dominantes raramente interferían.

La aparente tolerancia sexual del chimpancé macho resulta todavía más sorprendente si pensamos en la rareza de oportunidades reproductoras. Una hembra adulta normal sólo es sexualmente receptiva durante unas cuantas semanas cada cinco años. La mayoría de las comunidades constan de unas 15 hembras adultas, junto a un número igual de machos. De modo que, por término medio, habrá tres hembras receptivas por año, y sólo tres machos conseguirán engendrar descendientes esa temporada. La presión de la selección natural favorece el comportamiento que maximice las oportunidades de reproducirse. Sin embargo, al chimpancé macho no parece molestarle que otros comprometan su éxito reproductor al aparearse con la hembra con la que él acaba de copular. ¿Cómo explicarlo?

La respuesta reside en la exogamia de las hembras. Las hembras se introducen en la comunidad de chimpancés como extranjeros procedentes de otro territorio. Aunque las nuevas hembras pueden estar genéticamente emparentadas entre sí (si proceden de la misma comunidad), es más probable que no lo estén. En cambio, los machos de la comunidad sí están estrechamente emparentados, pues descienden de la misma estirpe de "patriarcas". Parece que ese parentesco genético entre machos justifica su aparente altruismo. La descendencia del mismo pequeño grupo de patriarcas supone que dos machos cualesquiera de la comunidad comparten algunos (sino muchos) genes. De ahí que, si un macho se reproduce, algunos de los genes del otro macho pasan también a la siguiente generación. El grado de éxito vicario depende de la extensión de la superposición genética: cuantos más genes comparta el macho que no ha logrado reproducirse con el que ha tenido éxito en la reproducción, mayor será el éxito genético vicario.

El grado de éxito reproductor que



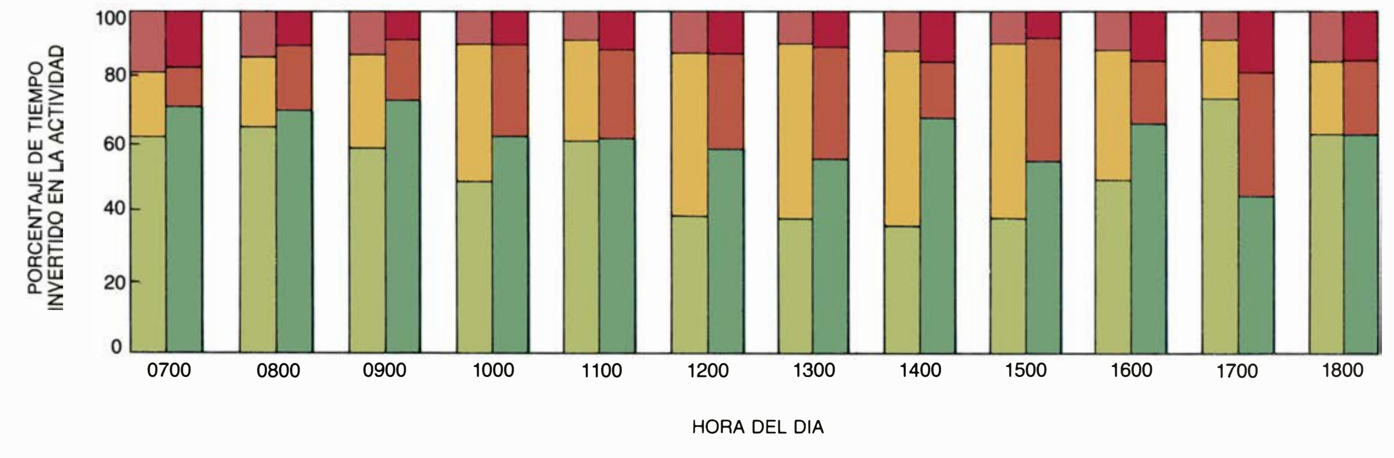
4. ASEO O ACICALAMIENTO; constituye una actividad social que, según parece, desempeña una función higiénica de gran importancia. Los chimpancés se asean por parejas, y alternan los papeles activo y pasivo. El aseo requiere una inspección visual cercana para eliminar los piojos de la piel. Como se indica a la izquierda, el cuerpo del chimpancé contiene zonas que quedan a la vista y que son fácilmente accesibles para el propio antropoide (*amarillo*), otras que son visibles marginalmente o son accesibles sólo con una mano (*verde*) y, por fin, otras que no le resultan visibles (*rojo*). Las observaciones del autor muestran que en las sesiones de aseo mutuo la mayor parte del tiempo se invierte en las zonas no visibles (*arriba*). Se ha señalado que el acicalamiento constituye un medio de facilitación social, en particular, el apaciguamiento de un socio más dominante. Tal facilitación podría realizarse aseando cualquier parte del cuerpo. La concentración en las zonas no visibles sugiere que la base principal de la función social del aseo es la eliminación de parásitos, actividad importante para el mantenimiento de la salud.

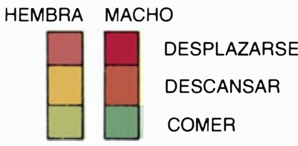
comparte un organismo cuando un pariente genético se reproduce lo denomina W. D. Hamilton (del Colegio Imperial de Ciencia y Tecnología, de Londres) eficacia inclusiva. El concepto de eficacia inclusiva ayuda mucho a explicar por qué los chimpancés macho cooperan en la alimentación y en el apareamiento. El grito de comida que los machos emiten al llegar a un árbol con fruta atrae a otros de su banda. Si éstos son otros machos o hembras inmaturas, es probable que se hallen genéticamente emparentados con el macho que ha lanzado el aviso. De ahí que cualquier mejora en su alimentación y en su capacidad de reproducirse la comparta el avisador como un aumento en su eficacia inclusiva. (Además, si el animal atraído por la llamada es una hembra en estro, el avisador puede aparearse con ella.) Si la cantidad de alimento del árbol es tan pequeña que el animal que ha convocado a los demás no puede alimentarse adecuadamente al llegar los otros, su eficacia inclusiva se reducirá. Sin embargo, observé que los chimpancés macho casi nunca ululaban al arribar a un árbol pequeño. La cooperación entre los miembros de la comunidad de chimpancés no se basa en el altruismo, sino en una forma compleja de autointerés.

Este autointerés desempeña asimismo un papel evidente en la cópula. Cuando un macho engendra descendientes, los demás machos de su comunidad comparten su éxito, porque aumenta su eficacia inclusiva. La magnitud del aumento varía con el número de genes compartidos, y es significativo que los machos de la comunidad de chimpancés estén muy estrechamente emparentados. En casos extremos, incluso cabe que un macho aumente su éxito reproductor sin siquiera reproducirse. Goodall y David C. Riss, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford, observaron un macho parcialmente paralítico, poco dotado, por tanto, para aprovechar las oportunidades de cópula. El macho prestó ayuda a su hermano más joven, gracias a la cual pudo éste alcanzar el rango de macho alfa. (El macho alfa es el macho dominante de la comunidad y el que más éxito tiene en llevarse "de safari" a las hembras en estro.) Así, valiéndose de una estrategia aparentemente altruista, el hermano paralítico obtuvo una recompensa genética indirecta: aumentó considerablemente su eficacia inclusiva. En una escala mayor, tales recompensas son esenciales para mantener unida la comunidad de machos y para evitar su fragmentación, como ocurre en el caso del orangután. El parentesco genético y la eficacia inclusiva son factores decisivos en la evolución de una comunidad mantenida por machos que cooperan en alimentarse, aparearse y defender su territorio.

La división entre los machos estrechamente emparentados y las hembras de su comunidad se extiende a todos los aspectos de la vida. Los machos tienden a elegir a otros como compañeros de andaduras, y también como socios en las prolongadas sesiones de aseo que con frecuencia siguen a la recolección alimentaria de la mañana; las hembras eligen a hembras como compañeras de viaje y pareja de acicalamiento. Machos y hembras muestran, incluso, pautas distintas de actividad diaria global. Tres actividades básicas ocupan el día de un chimpancé en libertad: desplazarse, alimentarse y descansar (asearse y todas las demás formas de vida social y de autoconservación). Los machos de Ngogo dedican más tiempo que las hembras a corretear (12 y 10 por ciento, respectivamente). También pasan más tiempo recolectando alimento que las hembras (62 y 52 por ciento, respectivamente); los machos, finalmente, están menos tiempo descansando (26 por ciento) que las hembras (38 por ciento).

No sorprende que los sexos presenten distintos presupuestos de actividad diaria, puesto que desempeñan papeles muy distintos en la producción de la siguiente generación. El concepto de inversión paterna, según definición de Robert L. Trivers, de la Universidad de Harvard, ayuda a esclarecer la interpretación de los papeles que corresponden a ambos progenitores en una comunidad animal. Con el propósito de cuantificar la inversión paterna, Trivers la definió como la fracción de la vida de un progenitor que se invierte en criar a cada descendiente hasta pasada la edad de dependencia. Para un chimpancé macho, la inversión paterna directa es despreciable, puesto que su papel puede concluir después de la cópula. En cambio, la hembra invierte nueve meses de gestación, seguidos por al menos cuatro o cinco años de dependencia extrauterina, con cada hijo. Durante este tiempo, la madre está constantemente con el joven chimpancé, protegiéndolo, mostrándole habilidades necesarias para la supervivencia y con frecuencia cargando con él cuando la pareja viaja. Las estadísticas de Gombe indican que una hembra vive típicamente de 35 a 40 años, y la reproducción comienza aproximadamente a la edad de 15 años. Así, cada hijo que sobrevive hasta la madurez supone una





5. PAUTAS DE ACTIVIDAD DIARIA de machos y hembras en la comunidad de chimpancés de Ngogo; diferían considerablemente entre sí. Los histogramas de la ilustración son valores medios de las observaciones de muchos chimpancés. Indican que los machos se desplazan más, recolectan más comida y descansan menos que las hembras. Las distintas pautas de actividad de machos y hembras reflejan los diferentes papeles de ambos sexos en la producción de la siguiente generación de la comunidad de chimpancés.

inversión de cerca de la cuarta parte de la duración de la vida del adulto. Si a la hembra le sobreviven tres o cuatro descendientes, les habrá dedicado la mayor parte de su edad adulta.

Dadas las distintas estrategias reproductoras de cada sexo, sus presupuestos de actividad habrán de ser fundamentalmente incompatibles. Una hembra no necesita desplazarse para encontrar pareja. Sólo precisa trasladarse lo indispensable para encontrar comida adecuada para ella y su hijo. Cualquier movimiento más allá de lo estrictamente necesario para tal propósito supone un alto coste metabólico, porque la madre chimpancé transporta a un joven simio. Por el contrario, los machos necesitan desplazarse, a veces mucho, para encontrar pareja y defender su territorio. Además, los machos adultos no suelen ocuparse directamente de la nutrición de sus descendientes, salvo si van acompañados de machos juveniles. Ni siquiera entonces el macho adulto transporta al juvenil. Por tanto, el coste del desplazamiento adicional no les resulta a los machos ni mucho menos tan alto como a las hembras. A la vista del coste más reducido del movimiento del macho y del mucho mayor incentivo para desplazarse (aumentan las oportunidades de aparearse), cabe esperar que las hembras descansen más y viajen menos que los machos.

Las recientes investigaciones de Goodall, Nishida, Wrangham, el autor y otros están esclareciendo la estructura de la comunidad de chimpancés. Cada vez hay más acuerdo en que la cooperación entre machos genéticamente emparentados en defensa de la zona vital constituye uno de los cimientos de la comunidad. A veces, esa defensa puede ser sanguinaria. Tras el apogeo del suministro de plátanos en Gombe, cuadrillas de machos realizaban rondas furtivas a lo largo de las fronteras de su zona vital, no con el ánimo de recolectar alimento, sino, a lo que parecía, para vigilar la linde del territorio de la comunidad. En dos ocasiones se vio a las rondas atacar a hembras extrañas que penetraron en la zona con sus hijos. En ambos casos mataron brutalmente a las crías. (Casos similares de infanticidio se han observado en otras zonas de estudio.)

Si esos juveniles hubieran vivido, habrían competido con los descendientes de la cuadrilla de machos por los recursos de la comunidad. En cambio, las hembras ofrecían oportunidades reproductoras a los defensores del territorio. Tras la muerte de sus hijos las hembras entraron rápidamente en estro. De no haber huido, hubieran podido aparearse con los machos de la comunidad, y con ello aumentar el éxito reproductor de los machos. Así, las rondas de los machos tratan de modo muy diferente a los otros chimpancés, en función de la competencia que los demás simios representen. En una serie de salvajes incursiones, los mismos machos de Gombe mataron a los machos de una pequeña comunidad de chimpancés situada al sur. Se extinguió la comunidad y los vencedores se anexionaron el territorio.

Si bien se está de acuerdo en que la cooperación entre los machos es fundamental para la estructura de la comunidad de chimpancés, no se ha alcanzado una avenencia completa acerca de dicha estructura. Así, Wrangham interpreta la banda de chimpancés como un fenómeno estrictamente masculino. Puesto que la pauta de desplazamientos de la hembra no corresponde a la de los machos, para ese autor las hembras no constituirían parte de la comunidad territorial. En el modelo de Wrangham, las zonas vitales de las hembras están esparcidas por el territorio de los machos como las pasas por un pastel. Que las fronteras de la zona vital de las hembras se hallen dentro de una comunidad de machos y no de otra sería algo más o menos accidental. Wrangham aduce que las hembras de chimpancé se comportan, en esencia, como las hembras de orangután, y la principal diferencia estriba en que a las de chimpancé las preña una coalición de machos en lugar de un señor supremo solitario.

El modelo de una comunidad basada en la pauta de desplazamientos y sólo en los intereses genéticos de los machos es atractivo, porque es simple. Sin embargo, un inconveniente de esta hipótesis es que omite varios factores de gran importancia en la vida de las hembras del chimpancé. Una hembra no puede limitarse a tomar una posición al azar en el paisaje, como supone el modelo "sólo para machos". Al alcanzar la madurez sexual, debe abandonar su comunidad natal para evitar la endogamia con sus parientes genéticos. Una vez ha parido un hijo, debe permanecer dentro del territorio de su pareja; de otro modo, machos extraños que ronden la frontera matarían a la cría. Así, las hembras de chimpancé que han tenido éxito reproductor y que poseen una cría confinarán su zona vital al interior de los límites de una única comunidad de machos.

Además, el comportamiento de las hembras de chimpancé sugiere que poseen intereses comunitarios. Dentro de su comunidad de adopción, la hembra tiende a interactuar socialmente sólo con un subconjunto de las demás hembras. Algunas de estas compañeras pueden proceder de su misma comunidad original y, por tanto, ser sus parientes genéticos. A diferencia de los orangutanes, las hembras del chimpancé prefieren desplazarse juntas. Y lo que resulta más intrigante, en algunos casos las hembras rechazan colectivamente a hembras extrañas que intentan penetrar en la zona vital de las mismas. Tal comportamiento implica una identidad de comunidad por parte de las hembras. Si a esas observaciones se les da un peso sustancial, podrían suponer que existe una comunidad de hembras separada, superimpuesta a la de los chimpancés macho.

Tanto Goodall como el autor mantienen que la estructura de la comunidad de chimpancés está basada por un igual en el comportamiento de los machos y de las hembras, y sirve de manera similar a ambos sexos. Debido a que las estrategias reproductoras de machos y hembras divergen de modo considerable no puede esperarse que su distribución y sus actividades diarias coincidan; pero los dos grupos forman una entidad única. La estructura social de fusión-fisión es suficientemente flexible para vencer esas contradicciones. Este tipo de estructura permite también que los antropoides se especialicen en el consumo de fruta, y que, a la vez, vuelvan a formar repetidamente los lazos precisos para mantener una comunidad grande y unificada.

Los seres humanos han vivido en bandas de cazadores-recolectores la mayor porción de su existencia. Puesto que la estructura patriarcal de fusión-fisión del grupo de chimpancés es similar a la organización de la mayoría de grupos cazadores-recolectores, puede que el estudio de los chimpancés proporcione algún atisbo sobre nuestras propias tendencias belicosas. Sin embargo, para que el estudio de la sociedad de los chimpancés rinda algún beneficio, se impone la necesidad de que los chimpancés sobrevivan. La tecnología humana está destruyendo las pluviselvas tropicales maduras del mundo a un ritmo tal que las habrá eliminado totalmente hacia el año 2035. El chimpancé es una especie gravemente amenazada por esa degradación. Espero que la sociedad humana deje a esos antropoides la suficiente extensión de sus hábitats para que sigan compartiendo la tierra con nosotros.

Topología de los espejismos

El proceso de transferencia relaciona las imágenes de los espejismos con los principios de la topología. Se interpretan así los espejismos sin necesidad de un conocimiento detallado de las condiciones atmosféricas

Walter Tape

La popa del barco semejaba unas tijeras gigantescas. En pocos minutos las tijeras desaparecieron mientras la parte superior del buque se desdoblaba en dos copias de sí misma, una de las cuales flotaba boca abajo en el cielo. Así veía yo el paso de un carguero de mineral en los Grandes Lagos desde la orilla; las dos imágenes se separaban, en ocasiones lentamente y en otras en cuestión de segundos. Al subir o bajar la posición de mi observatorio en la orilla, los espejismos cambiaban de forma espectacular.

Aunque las imágenes de los espejismos pueden ser muy complejas, muchas de sus características se explican con gran facilidad mediante los principios topológicos. Vamos a suponer que las fotografías de un barco y sus espejismos que se reproducen en la página opuesta se imprimen en una lámina de goma; en tal caso, y en teoría, cada fotografía se podría deformar ligeramente de manera que pareciera idéntica a la imagen del barco sin deformar. Algunas fotografías de espejismos sólo tendrían que ser deformadas ligeramente, pero en el caso de los reproducidos en esta figura sería necesario doblar algunas de las partes de la lámina varias veces.

Utilizando el modelo teórico de la lámina de goma podemos conseguir que las fotografías adquieran un significado claro. Por ejemplo, la curva blanca que aparece junto a la proa del barco en la fotografía de la parte superior está formada por las dos imágenes unidas de un mástil recto; la imagen de abajo está derecha y la de arriba invertida. Inmediatamente encima de las dos imágenes unidas hay una tercera imagen recta algo borrosa. Para que esta fotografía fuera idéntica a una imagen sin deformar del barco, la lámina de goma que la soporta tendría que doblarse a lo largo de la línea horizontal en la que se encuentran las dos imágenes mezcladas. A continuación tendría que doblarse una vez más a lo largo de una línea horizontal situada entre la imagen invertida y la imagen de la parte superior.

Utilizado en una forma más completa, el modelo de la lámina de goma proporciona el marco adecuado para aplicar ciertos principios topológicos abstractos a la descripción de las imágenes de los espejismos. La aplicación de los métodos topológicos a la interpretación de los espejismos proporciona una información que no requiere un conocimiento cuantitativo de las complejas condiciones atmosféricas responsables de su producción. Recíprocamente, los espejismos permiten ilustrar gráficamente nociones topológicas.

Los espejismos se producen cuando las condiciones atmosféricas dan lugar a que los rayos luminosos se desvíen al recorrer el camino comprendido entre el objeto observado y el ojo. El observador interpreta erróneamente el camino seguido por la luz como si hubiera sido en línea recta y, en consecuencia, ve una imagen desplazada [*véase la figura 2*].

Si varios rayos salen del mismo punto del objeto y llegan finalmente al ojo, el observador ve otras tantas imágenes múltiples de dicho punto.

En una versión más acabada de nuestro modelo de la lámina de goma se puede considerar que la lámina maleable forma parte de una pequeña esfera, conocida como "esfera imagen", centrada en el ojo del observador. La superficie de la esfera imagen guarda un parecido exacto con el espejismo visto por el observador. Todo rayo que una el ojo y el objeto cruzará la esfera imagen por algún punto. Este punto de la esfera imagen dará lugar a una imagen del punto del objeto que se encuentre sobre el mismo rayo. Cuando este proceso se repite para todos los rayos luminosos, cada uno de los puntos de la imagen del espejismo que ve un observador aparecerá sobre la esfera imagen.

La segunda, una esfera mucho mayor, denominada "esfera objeto", centrada también en el ojo del observador, atraviesa el objeto sujeto a observación. Se puede considerar que la superficie de la esfera objeto soporta una

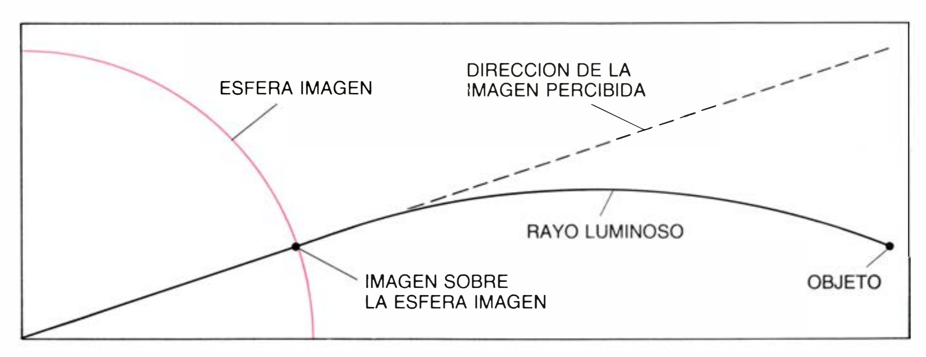


1. ESPEJISMOS de un carguero de mineral en los Grandes Lagos. Presentan algunas características comunes susceptibles de ser interpretadas a partir de ciertos principios topológicos. Uno de estos principios es el denominado teorema del número impar, que establece que todas las partes de un objeto dado (el barco en este caso) deben producir un número impar de imágenes en el espejismo. Por ejemplo, la letra roja *C* de la chimenea da lugar a tres imágenes diferentes en la fotografía de la parte superior; dos de las imágenes aparecen mezcladas y la tercera se sitúa sobre ellas. En algunas de las fotografías parece existir solamente dos imágenes del casco. Un examen más detenido pone de manifiesto que la imagen superior consiste en dos imágenes gemelas, una de las cuales se ve muy reducida. Sin embargo, la cuarta fotografía parece tener sólo dos imágenes genuinas, prueba de que el teorema del número impar está sujeto a algunas restricciones. De hecho, bajo ciertas condiciones atmosféricas, dicho teorema no es válido y, bajo otras condiciones, algunas imágenes se reducen hasta tal punto que resultan absolutamente invisibles.

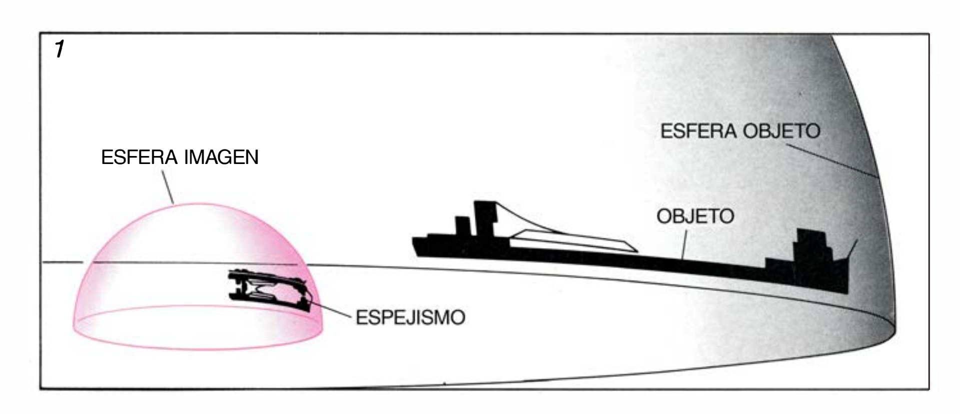


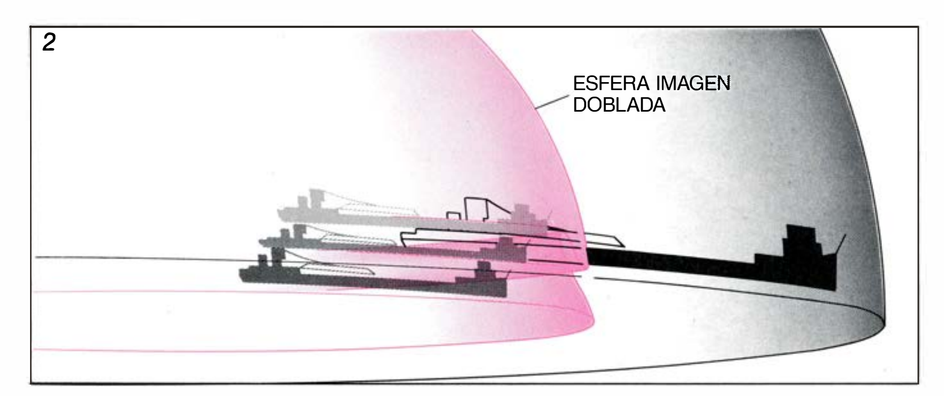


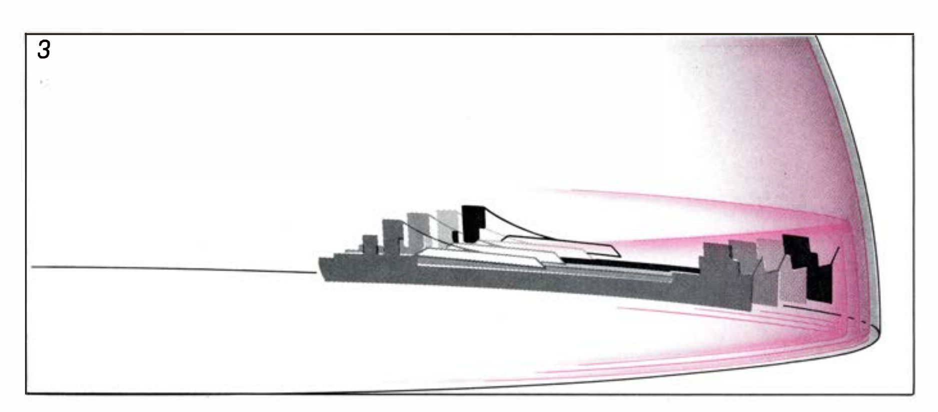


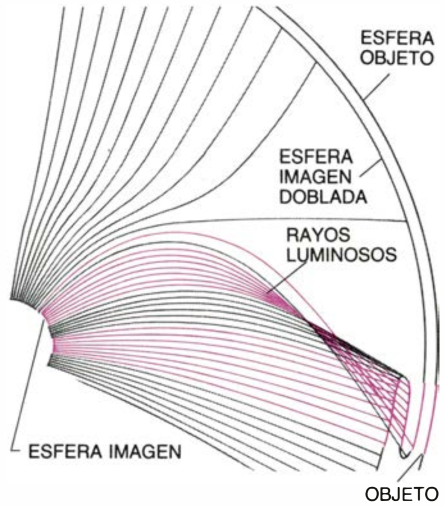


2. DESVIACION DE LOS RAYOS LUMINOSOS que origina los espejismos. Cuando un rayo se desvía (*línea continua*), llega al ojo según una dirección diferente a la dirección en la que el objeto se encuentra realmente. El observador interpreta erróneamente el recorrido de la luz como si fuera una recta (*línea discontinua*) y, por tanto, ve una imagen desplazada. La dirección de la imagen percibida por el observador se puede representar como un punto situado sobre una pequeña esfera, conocida como esfera imagen y centrada en el ojo del observador. (Esta ilustración y la siguiente han sido realizadas por Hank Iken.)









3. PROCESO DE TRANSFERENCIA que proporciona la base para aplicar los principios topológicos a los espejismos. La imagen del espejismo aparece sobre una esfera imagen, centrada en el ojo del observador (*1*). Una esfera objeto, centrada también en el ojo del observador, representa al objeto tal como aparecería sin deformación. El proceso de transferencia dilata y deforma la esfera imagen hasta encontrar a la esfera objeto (*2*); cada punto de la esfera imagen sigue el camino recorrido por un rayo luminoso (trayectorias representadas a la derecha). Cuando la esfera imagen se expande puede producir ciertos pliegues o arrugas. Al final del proceso (*3*) la esfera imagen se ha deformado y coincide exactamente con la imagen del objeto no deformado.

imagen de tamaño real del objeto tal como es realmente (es decir, se trata de una imagen no deformada). No es necesario que la esfera objeto sea exactamente esférica; esta esfera se puede curvar con el objeto de suerte tal que cada rayo del ojo la alcance. Por ejemplo, si el objeto es un barco, la esfera objeto sería aplanada por la parte inferior para que una parte de su superficie coincidiera con el agua situada entre el barco y el observador.

Las trayectorias recorridas por los rayos luminosos entre el ojo y el objeto permiten asociar a cada uno de los puntos de la esfera imagen con un punto específico de la esfera objeto. Supongamos que la esfera imagen es de goma y que se expande físicamente hasta coincidir con la esfera objeto. Cada punto de la esfera imagen se mueve hacia afuera a lo largo del camino recorrido por un rayo luminoso hasta que encuentra a la esfera objeto. Si no existen condiciones para que se produzca un espejismo, los rayos son líneas rectas y la esfera imagen se expande uniformemente. Si los rayos luminosos se curvan (es decir, si se produce un espejismo), la esfera imagen puede sufrir algunos pliegues o arrugas a medida que se expande y, por tanto, existirán regiones donde más de una capa de la esfera imagen deformada se adhiere a una misma zona de la esfera objeto.

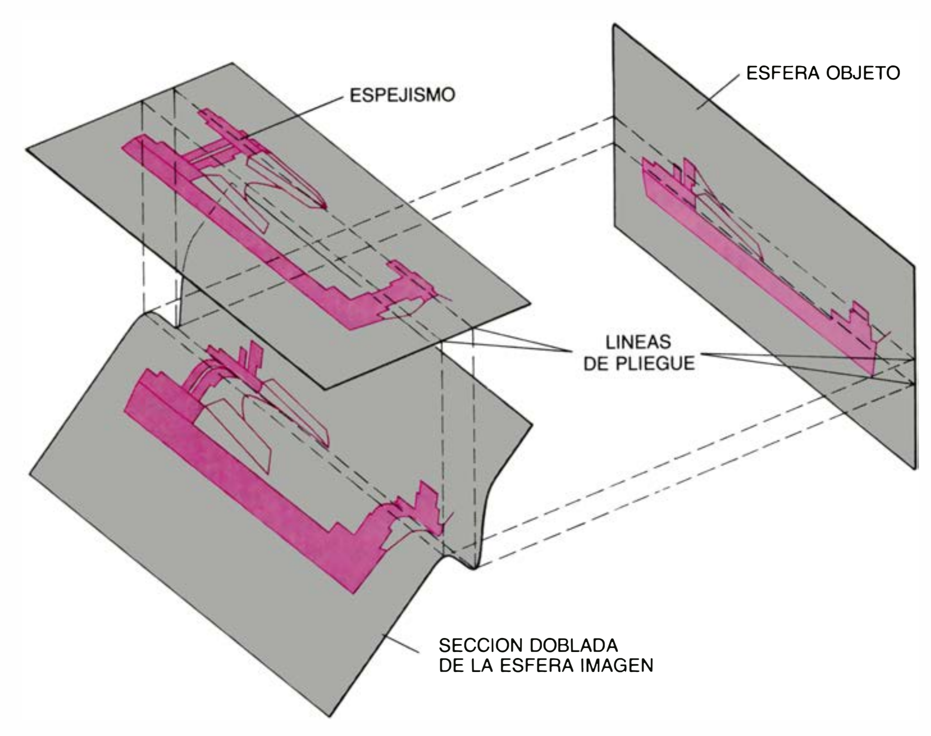
El proceso en el que cada punto de la esfera imagen es "proyectado" a lo largo de un rayo luminoso hasta un punto de la esfera objeto, se conoce con el nombre de transferencia del espejismo. El proceso de transferencia se inicia en la imagen del espejismo sobre

la esfera imagen, distorsionándola de forma tal que coincida con la imagen no deformada de la esfera objeto.

Suponiendo que el espejismo sobre la esfera imagen se borrara, el proceso de transferencia permitiría reproducirlo. Una vez que la esfera imagen se ha deformado y comprimido sobre el interior de la esfera objeto, cada sección de la esfera imagen se parecerá a la sección de la esfera objeto contra la que se comprime. Si varias capas de la esfera imagen deformada se ponen en contacto con una misma región de la esfera objeto, sobre cada una de ellas se producirá la misma impresión.

En este caso, el resultado del proceso de transferencia se invertiría: la esfera imagen deformada se encogería de nuevo, moviéndose a lo largo de los rayos luminosos hasta recuperar su forma esférica original. Al hacerlo así, la impresión o impresiones sobre ella se deformarían. La imagen deformada resultante sería el espejismo.

La figura 4 muestra el efecto geométrico de un proceso de transferencia que produce dos pliegues. Las posiciones en que las líneas plegadas se sitúan sobre el objeto (un barco en este caso) están estrechamente relacionadas con el aspecto del navío en el espejismo; a cada uno de los puntos situados entre estas líneas corresponden tres imágenes en el espejismo. El espejismo reproducido en esta figura se parece a la segunda fotografía de la secuencia de la figura 1. Para construir el espejismo reproducido en la fotografía superior, la línea de plegado más baja tendría que colocarse ligeramente más alta sobre el objeto. En la cuarta fotografía el pliegue más bajo caería cerca de la línea del agua. Para crear el espejismo reproducido en la tercera fotografía se necesitan otros pliegues adicionales.



4. LINEAS DE PLIEGUE producidas en un proceso de transferencia; tienen un efecto crítico sobre la imagen de un espejismo. En este caso, la imagen distorsionada de un barco (*arriba, a la izquierda*) se ha doblado y se ha deformado adecuadamente para que coincida con la imagen del barco sin deformar (*esquema de la derecha*). Los puntos del barco que descansan entre las líneas de pliegues producen tres imágenes en el espejismo, en tanto que todas las partes situadas fuera sólo dan lugar a una imagen.

Utilizando una versión más completa de nuestro modelo de la lámina de goma podemos introducir ciertos conceptos topológicos. Uno de estos conceptos es el "grado" del proceso de transferencia. Supongamos que se produce una transferencia de una esfera a otra. Cada punto de la segunda esfera (la esfera objeto en el caso de nuestro modelo) puede tener antecedentes: los puntos de la primera esfera que son transferidos a ella. La región que rodea a un antecedente puede estar invertida respecto a la región que rodea al punto original (tal como se ve desde el interior de las esferas); en este caso se dice que la región que rodea al antecedente tiene la orientación opuesta a la de la región original. El grado del proceso de transferencia en un punto dado de la segunda esfera es igual al número de antecedentes con la misma orientación del punto original menos el número de antecedentes con la orientación opuesta.

Un proceso de transferencia cuyo grado es relativamente fácil de calcular es el que corresponde al caso en que no existan las condiciones adecuadas para que se produzca un espejismo. La esfera imagen no se deforma en absoluto a medida que se expande para encontrarse con la esfera objeto. En este caso, a cada punto de la esfera objeto corresponde exactamente un antecedente en la esfera imagen. Por otro lado, el antecedente tiene la misma orientación que el punto original sobre la esfera objeto. En consecuencia, este proceso de transferencia es de grado 1.

Un ejemplo más complejo se refiere a un caso que nunca podría ser el proceso de transferencia de un espejismo real pero que, a pesar de ello, ilustra un teorema topológico: el grado de cualquier proceso de transferencia suave es el mismo en todas las regiones de la segunda esfera.

Supongamos que una pequeña esfera se desinfla y se comprime contra la superficie cóncava de una parte de otra esfera mayor (una imagen útil de este caso puede ser la de un balón desinflado pegado en el interior de un globo). En este proceso, algunas zonas de la esfera mayor no están en contacto con la esfera menor, mientras que el resto tiene dos capas comprimidas sobre ella. Supongamos que sobre una región de la esfera mayor que está en contacto con la esfera menor se dibuja una flecha dirigida hacia la izquierda, y que dicha flecha se transfiere directamente sobre cada una de las capas de la esfera pequeña. En tal caso las dos copias de la flecha tendrán orientaciones opuestas vistas desde el interior de la esfera pequeña (tras haberse inflado de nuevo): una de las dos flechas señalará a la izquierda y la otra señalará a la derecha. En consecuencia, este proceso será de grado 0 (un antecedente "positivo" y un antecedente "negativo") para todos aquellos puntos situados dentro de la región de la esfera mayor que estén en contacto con la esfera pequeña. El proceso será también de grado 0 (no antecedentes) para aquellos puntos que no se hallen en contacto. El grado es el mismo en ambas regiones.

Esta propiedad de los procesos de transferencia se conoce con el nombre de invariancia del grado. La invariancia del grado adquiere un significado intuitivo si consideramos la figura anterior. Cuando las líneas de pliegue se mueven a lo largo de un punto del objeto, el

punto gana o pierde sus antecedentes con orientaciones opuestas.

¿Cuál es el grado de un proceso de transferencia suave en un espejismo? En el modelo de la lámina de goma, el número de antecedentes de un objeto dado es igual al número de imágenes de este objeto que ve un observador. Por tanto, si existe una región de la esfera objeto que aparezca exactamente una vez y con su orientación normal en el espejismo, el proceso de transferencia será de grado 1. En la práctica, éste es siempre el caso: la mayor parte de lo que ve el observador no está distorsionado.

Dado que el proceso de transferencia suave de un espejismo debe ser de grado 1, existen ciertas restricciones sobre los tipos de imágenes que pueden aparecer en el espejismo. Por ejemplo, en principio, dicho espejismo no podría contener tres imágenes de un barco, las tres derechas y dirigidas en la misma dirección. En tal caso, el proceso de transferencia sería de grado 3, o −3, pero no de grado 1.

Otra de las restricciones se puede expresar mediante el teorema del número impar: si la transferencia es suave, todo objeto tendrá un número impar de imágenes. La demostración de este teorema es relativamente sencilla. El grado de cualquier proceso de transferencia asociado con un espejismo es 1. En consecuencia, el número de imágenes orientadas positivamente debe ser uno más que el número de imágenes orientadas negativamente. De aquí se desprende que el número de imágenes positivas más el número de imágenes negativas, es decir, el número total de imágenes, debe ser impar.

El teorema del número impar se ilustra adecuadamente en algunas de las fotografías de la figura 1. Por ejemplo, en la fotografía de la parte superior, hay dos imágenes fundidas de la letra roja *C* de la chimenea del barco; estas imágenes se sitúan inmediatamente por debajo de una tercera, menor. La tercera fotografía empezando por arriba probablemente tiene cinco imágenes de la letra *C*, aunque a la vista de la fotografía es difícil asegurarlo.

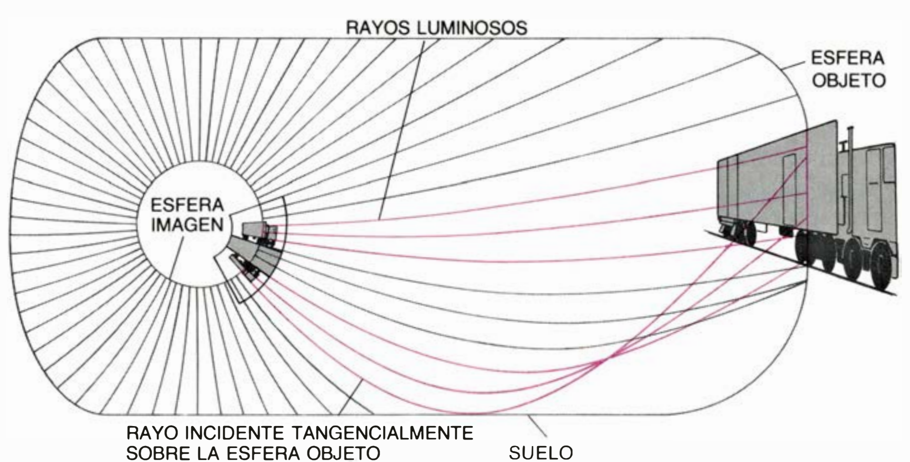
Los espejismos y la demostración del teorema del número impar constituyen una aplicación gráfica de la invariancia del grado, una propiedad topológica. El éxito de la demostración merece ser destacado, dado que dicha demostración se basa en ciertas suposiciones concernientes a rayos luminosos y condiciones atmosféricas.

La demostración en cuestión se basa en el hecho de que el proceso de transferencia de toda la esfera imagen a la esfera objeto sea suave (o al menos continuo). Para que se cumpla esta condición, el índice de refracción de la atmósfera (la velocidad de la luz a través de la atmósfera) debe variar suavemente y todos los rayos que lleguen al ojo deben atravesar la esfera objeto transversalmente, es decir, no deben cortarla tangencialmente.

Una clase de espejismos, la de los llamados espejismos inferiores, ilustra la importancia de esta "condición de transversalidad". En un espejismo inferior los rayos luminosos se desvían hacia arriba cuando pasan del objeto al ojo. La figura 5 muestra un espejismo inferior en el que un rayo de un camión se refleja tangencialmente en el suelo, violando así la condición de transversalidad. (En este caso el suelo forma parte de la esfera objeto.) La pequeña región de la esfera imagen justo por encima del rayo tangencial es transferida hacia el camión, en tanto que la región justo por debajo del rayo tangencial es transferida hacia el suelo lejos del camión.

En consecuencia, este proceso de transferencia no es continuo. Un proceso de transferencia continuo es aquel en que las regiones vecinas de la esfera imagen se transfieren a regiones vecinas de la esfera objeto. Para deformar la fotografía de suerte tal que se ajustara a una imagen no deformada del camión, ante todo tendríamos que cortarla a lo largo de la línea en la que el "charco" parece comenzar. (Por supuesto, tal charco no existe; se trata simplemente de una imagen de las montañas lejanas.) Este espejismo viola la conclusión del teorema del número impar, puesto que contiene exactamente dos imágenes de la parte inferior del camión.





5. ESPEJISMOS INFERIORES, en los que los rayos luminosos se desvían hacia arriba cuando van del objeto al observador; violan frecuentemente el teorema del número impar. Cuando un rayo luminoso incide tangencialmente sobre la superficie de la esfera objeto (*abajo*), las regiones de la esfera imagen que están próximas se asocian con las regiones de la esfera objeto que están alejadas. En este caso, las regiones situadas por encima del rayo tangencial se asocian con el camión, en tanto que las regiones situadas por debajo de dicho rayo se asocian con el suelo lejos del camión. El teorema del número impar es inaplicable cuando se producen estas discontinuidades. Obsérvense dos imágenes de la parte inferior del camión.





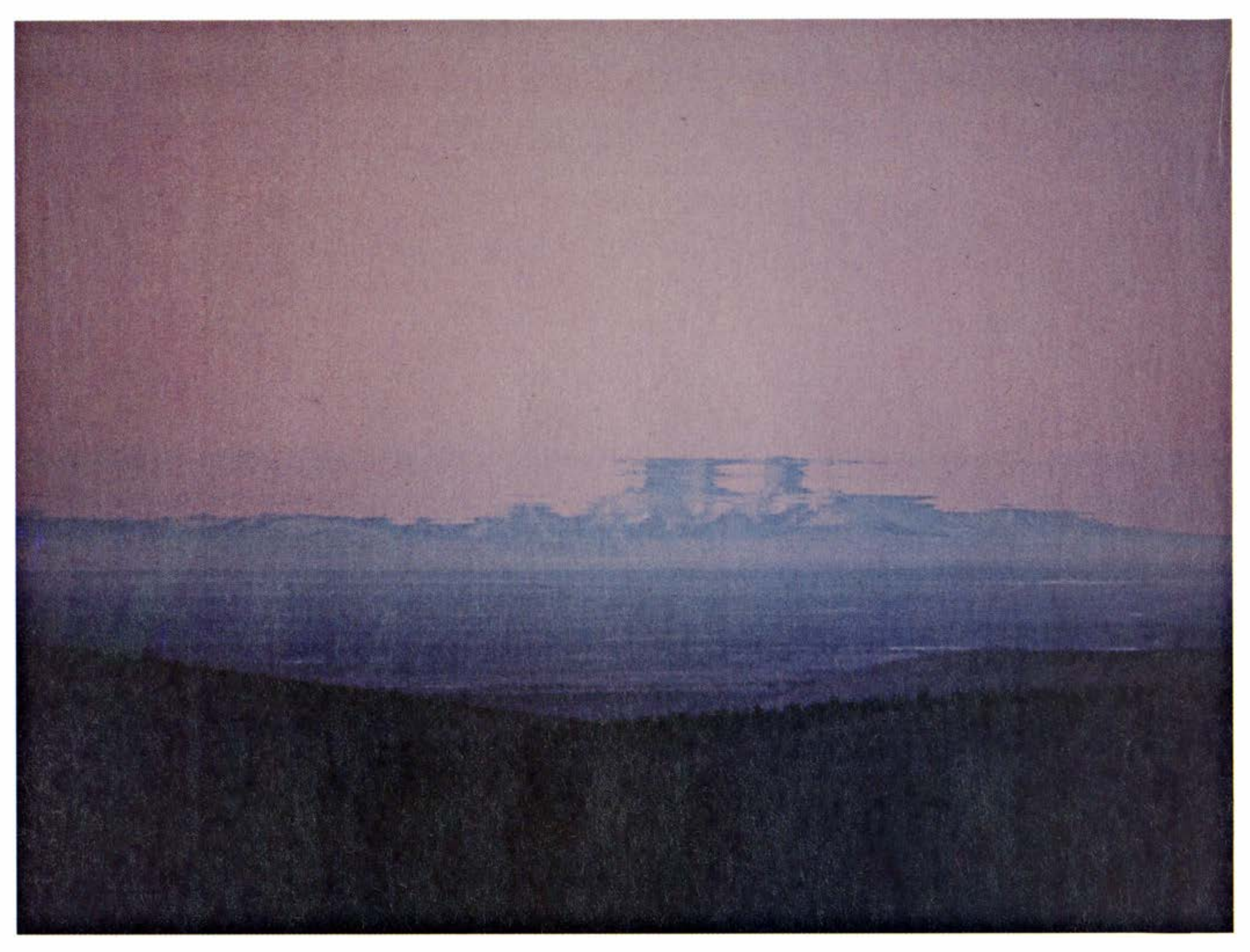
6. GRAN AUMENTO producido en un espejismo en las proximidades de las líneas asociadas con los pliegues anchos. Una cadena de montañas se deforma a causa de un pliegue y configura una sucesión de acantilados. La mayoría de las imágenes gemelas próximas están originadas por estos pliegues.

En un espejismo superior (un espejismo en el que los rayos de luz se desvían hacia abajo en relación con la superficie de la tierra), suele ser posible escoger la esfera objeto de forma tal que no existan rayos tangenciales. Si las condiciones atmosféricas varían lentamente, el proceso de transferencia será suave y las conclusiones del teorema del número impar serán válidas. Las fotografías del barco que se reproducen en este artículo son ejemplos de espejismos superiores.

Algunos espejismos superiores, tales como la cuarta fotografía de la secuencia de la figura 1, parecen mostrar un número par de imágenes. En algunos casos, la razón de este hecho estriba en que las condiciones atmosféricas son tan caóticas que el proceso de transferencia resulta discontinuo. Sin embargo, para espejismos superiores bien formados, como sucede con los reproducidos aquí, el proceso de transferencia debería ser considerado discontinuo sobre la base de las imágenes perdidas. En estos casos, la pérdida de imágenes está originada por otro fenómeno: un proceso de reducción. La reducción puede ser un efecto secundario de la ampliación que se puede producir cerca de los pliegues anchos. Estos pliegues son el sujeto de un teorema demostrado por Hassler Whitney, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton.

Whitney demostró que las transferencias suaves de una superficie a otra no suelen ser más complicadas localmente (es decir, en una región pequeña) que un pliegue o doblez. (Esta es una forma sencilla de expresar la conclusión del teorema de Whitney, de carácter mucho más técnico.) Una de las consecuencias de este teorema permite afirmar que dos imágenes gemelas próximas en un espejismo deben considerarse casi siempre como el resultado de un pliegue.

Un pliegue suave es mucho más sutil que una arruga. En un proceso de transferencia suave, las regiones de la esfera imagen que estén situadas cerca de la línea de un pliegue resultarán muy comprimidas. Cuando la región comprimida se desdobla, se produce una expansión; la imagen resultante estará muy ampliada en la línea de pliegue. (Sin embargo, a veces sucede que la zona expandida ocupa una superficie tan pequeña que la ampliación ni se advierte.) Las fotografías de la figura 6



7. GRAN REDUCCION producida cuando un espejismo contiene un número elevado de imágenes múltiples. En esta imagen deformada de una cordillera (no la reproducida anteriormente) las imágenes reducidas producen una serie de barras horizontales. Cada una de estas barras consta quizá de dos imágenes agrupadas de una parte de la cordillera. Por representar una serie de torres en el aire, se conoce como espejismo de Fata Morgana, en recuerdo de la leyenda del hada que construía castillos en el aire. Estos espejismos se producen cuando las líneas de pliegue se sitúan en un horizonte peculiar.

constituyen un ejemplo típico de esta ampliación. Las líneas de pliegue se pueden producir tanto en los espejismos inferiores como en los superiores debido a que el teorema de Whitney sólo exige que el proceso de transferencia en la región de interés sea suave.

Los pliegues desempeñan probablemente un papel clave en la producción de los denominados espejismos de Fata Morgana. Se decía que el Hada Morgan (Fata Morgana) era capaz de construir castillos en el aire. Yo creo que muchos de los espejismos de Fata Morgana son sencillamente espejismos superiores en los que la existencia de un pliegue ancho situado adecuadamente produce una imagen en el horizonte parecida a "un paisaje con ciudades, torres y murallas". Las ligeras ondulaciones en las líneas del pliegue podrían producir resultados similares incluso en el caso de que el perfil del horizonte no presentara irregularidades.

La intuición sugiere que algunas de las imágenes de un espejismo superior deben aparecer necesariamente comprimidas para dejar sitio libre para las imágenes ampliadas o las múltiples. Esta es nuestra explicación para las imágenes pequeñas o desaparecidas en algunas de las fotografías.

Para hacer más precisa esta idea intuitiva, sería conveniente comparar directamente el tamaño de una imagen no distorsionada con la de un espejismo. Con este fin, vamos a suponer que el proceso de transferencia deforma la esfera imagen pero no la dilata. Imaginemos que dicho proceso se inicia a partir de una esfera elástica que cubre un globo rígido. Tanto el globo como la esfera elástica soportan imágenes del espejismo. El proceso de transferencia distorsiona y reestructura el material de la esfera; la esfera deformada resultante está todavía pegada al globo, quizá con capas múltiples en algunos lugares. Dado que el proceso de transferencia es de grado 1, la esfera deformada debe cubrir todo el globo. El globo rígido uniforme soporta todavía una imagen del espejismo; la superficie de la esfera elástica se ha deformado para ajustarse a la imagen no distorsionada del objeto. Como la esfera deformada está pegada a la superficie del globo, ambos tienen el mismo radio.

Para calcular la ampliación que corresponde a un punto dado del espejismo, vamos a seleccionar una pequeña región alrededor de dicho punto sobre la superficie de la esfera uniforme; apliquemos entonces el proceso de transferencia a esta región para obtener la región transformada (es decir, la región correspondiente de la esfera elástica deformada). La región original produce una imagen de espejismo de una parte del objeto y la región transformada representa una imagen no deforma-

da del mismo. La ampliación de ese punto del espejismo es igual a la relación entre la superficie ocupada por la región en cuestión en la esfera uniforme (que indica el tamaño del objeto en el espejismo) y la superficie ocupada por la región correspondiente en la esfera deformada (que indica el tamaño del objeto sin deformar).

La reducción en un punto es el inverso de la ampliación. Es decir, la reducción es igual al cociente entre la superficie de la región transformada (parte de la esfera deformada) y la superficie de la región original (parte de la esfera uniforme, original). En consecuencia, la reducción media de un proceso de transferencia (el valor de la reducción promediada para todos los puntos de la esfera imagen) será igual a la superficie total de la esfera elástica deformada, incluyendo la superficie de todas las capas múltiples, dividida por la superficie del globo uniforme.

Si en el espejismo no se producen imágenes múltiples no habrá capas múltiples. Ambas esferas tendrán la misma superficie y la reducción media será igual a 1. Esto confirma nuestra creencia original de que si una región del espejismo aparece expandida, otra debe aparecer contraída.

Si existen imágenes múltiples, la reducción media aumentará como consecuencia de la existencia de las correspondientes capas múltiples. Este hecho confirma la idea intuitiva de que ciertas partes de un espejismo deben contraerse y dejar sitio libre para las imágenes múltiples. De este modo, la teoría predice la existencia de una gran reducción en algunas regiones. En consecuencia, la pérdida de una imagen no significa necesariamente que el proceso de transferencia sea discontinuo. Sin embargo, el impacto pragmático del teorema del número impar (así como el impacto de la conclusión de que los procesos de transferencia de los espejismos son de grado uno) disminuye como consecuencia de estas grandes reducciones.

La ampliación y la reducción son particularmente evidentes en un espejismo cuyo proceso de transferencia dependa casi por completo de la altura y no de la posición horizontal del objeto. En tales casos, la distorsión se limita en la práctica a diferentes bandas horizontales estrechas de la esfera imagen. Cualquier ampliación o reducción del espejismo es vertical; en el caso de que existan imágenes múltiples, deberán compensarse con una contracción vertical dentro de la banda horizontal. De aquí que el espejismo pueda aparecer fuertemente comprimido (como sucede en la figura 7), especialmente en el caso de que existan muchas imágenes del mismo objeto. Yo creo que las líneas horizontales que se ven a veces en las salidas o las puestas de sol son en realidad imágenes múltiples de algunas partes de éste cuyo tamaño se ha reducido considerablemente.

Aunque a lo largo de este artículo me he referido únicamente a los espejismos terrestres, la mayoría de las ideas expuestas aquí se pueden aplicar también a los espejismos cósmicos. Estos fenómenos se producen cuando los objetos de gran tamaño actúan como lentes gravitacionales, desviando los rayos luminosos procedentes de estrellas u otros objetos distantes. El hecho de que el teorema del número impar fuera demostrado por un astrónomo, William L. Burke, del Observatorio Lick, no resulta sorprendente. Como consecuencia del teorema del número impar, la óptica gravitacional es una explicación poco plausible de las imágenes quasar en aquellos casos en que se detecta un número par de imágenes similares.

La mayoría de las conclusiones a las que hemos llegado aquí se basan en dos suposiciones: que el índice de refracción de la atmósfera es una función suave de la posición y que los rayos que llegan al ojo cortan a la esfera objeto transversalmente. Naturalmente, si alguna de estas dos hipótesis falla, como sucede con la condición de transversalidad en el caso de muchos espejismos inferiores, las conclusiones pueden también fallar. Por otro lado, hemos visto que si la reducción es importante, las predicciones basadas en el teorema del número impar pueden resultar invalidadas en la práctica. No obstante, una aproximación topológica a este problema proporciona el medio de interpretar globalmente los espejismos. Esta aproximación nos permite comprender algunas características de los espejismos más frecuentes, como sucede por ejemplo con la gran reducción que se observa frecuentemente en los espejismos que presentan imágenes múltiples de un mismo objeto. Algunas reglas, tales como el teorema del número impar, pueden resultar muy valiosas como indicadores de que en la atmósfera existen pequeñas imágenes adicionales o irregularidades, incluso en el caso de que no puedan garantizar que estas imágenes se verán realmente.

Sifones en los acueductos romanos

Para construir un acueducto a través de un valle, los romanos utilizaban un puente o un sifón. Este se basaba en el principio según el cual el agua encerrada dentro de una tubería retorna siempre hasta su nivel de origen

A. Trevor Hodge

Obra de ingeniería romana, digna de admiración; fue el sistema de acueductos que suminist.aba diariamente millones de litros de agua a las principales ciudades del imperio. Los acueductos atravesaban kilómetros de muy dispar topografía. Para trazar un acueducto que salvara un valle, los romanos conocían dos soluciones: el puente, que se limitaba a mantener la pendiente inclinada del acueducto, y el sifón, que llevaba el agua en caída brusca por una ladera del valle y en subida empinada por la otra, en virtud del principio según el cual el agua encerrada en una tubería siempre asciende hasta su altura original. Se recurría al puente si el valle era somero; al sifón, si la profundidad del valle lo exigía por el peligro inherente a un puente demasiado alto.

Todo el mundo sabe lo que se entiende hoy por sifón: un tubo o conducción que transporta un líquido desde un nivel hasta otro sobre una elevación intermedia, siguiendo un recorrido similar a la letra n. En otras palabras, el líquido comienza ascendiendo, impulsado por una bomba u otra fuerza exterior; en segundo lugar, la presión atmosférica de la superficie del estanque originario mantiene el líquido en movimiento. En más de una ocasión habremos realizado una aplicación típica de este principio del sifón: en el depósito de gasolina del automóvil introducimos la boca de un tubo, aspiramos por el otro extremo de la manguera para poner el líquido en movimiento y volcamos rápido ese extremo en un recipiente. Siempre que el recipiente no sea más alto que el nivel de gasolina del depósito, el líquido fluirá.

La estructura romana se denomina, con toda propiedad, sifón invertido: el líquido recorre un trazado en U; el sifón empieza a actuar en cuanto el fluido penetra en un brazo de la letra. En un sifón invertido simple, el líquido que entra por un extremo de la U sube hasta el otro extremo; en los sifones romanos, debido a la resistencia opuesta por las tuberías, el extremo receptor tenía que ser algo más bajo que el extremo de arranque.

Aunque se conoce la existencia de una veintena de estos sifones, apenas si se ha investigado la función que cumplían en la hidraúlica romana. Los sifones dejan escasas huellas. A diferencia de los acueductos-puentes, espectaculares, se tendían a ras de suelo y estaban, por tanto, más expuestos a agresiones de vario tipo. Añádase a ello que los sifones desempeñaron un papel secundario en el sistema de acueductos de la Roma metropolitana, objeto de estudio intenso por los modernos expertos. (Los sifones parecen haberse construido preferentemente en Francia, sobre todo en los alrededores de Lyon, ciudad que contaba con un total de nueve sifones en los cuatro acueductos que la servían.) Ambas causas explican la menguada atención que hasta hoy han recibido.

Muestra de ese olvido es la larga lista de defensores de la teoría –vigente todavía en los manuales de hidráulica romana, junto con otros errores– que sostiene que los romanos se dedicaron a la construcción de acueductos-puentes con preferencia, porque no podían fabricar tuberías de una resistencia suficiente para soportar la presión ejercida en un sifón invertido. La realidad es que las tuberías de sus sifones llevaban el agua a una presión considerable. En 1875, el ingeniero francés Eugène Belgrand preparó réplicas de las tuberías romanas, las sometió a ensayos destructivos y sólo fallaron cuando la presión alcanzó 18 atmósferas. Significa ello que, en principio, las tuberías habrían funcionado perfectamente en un sifón sumergido 180 metros por debajo del nivel natural del agua. Este tipo de sifón hubiera llegado a la profundidad suficiente para reemplazar más de tres puentes de Gard, construidos uno encima del otro. (El Pont du Gard, un espectacular acueducto romano en puente levantado cerca de Nimes, en el sur de Francia, mide 50 metros de altura.)

Un sifón normal comenzaba en el punto donde un acueducto, discurriendo como siempre en canal de fábrica descubierto, alcanzaba el límite del valle que iba a atravesar [*véase la figura 2*]. Allí el agua penetraba en un depósito de cabecera construido en fábrica de ladrillo, perpendicular al canal. Esta estructura conformaba en realidad un depósito de distribución, porque el sifón no constaba de una tubería única (como en la ingeniería moderna), sino que lo integraba una batería de nueve tuberías pequeñas, una al lado de otra. Sus acometidas colocábanse en hilera en la parte inferior del depósito.

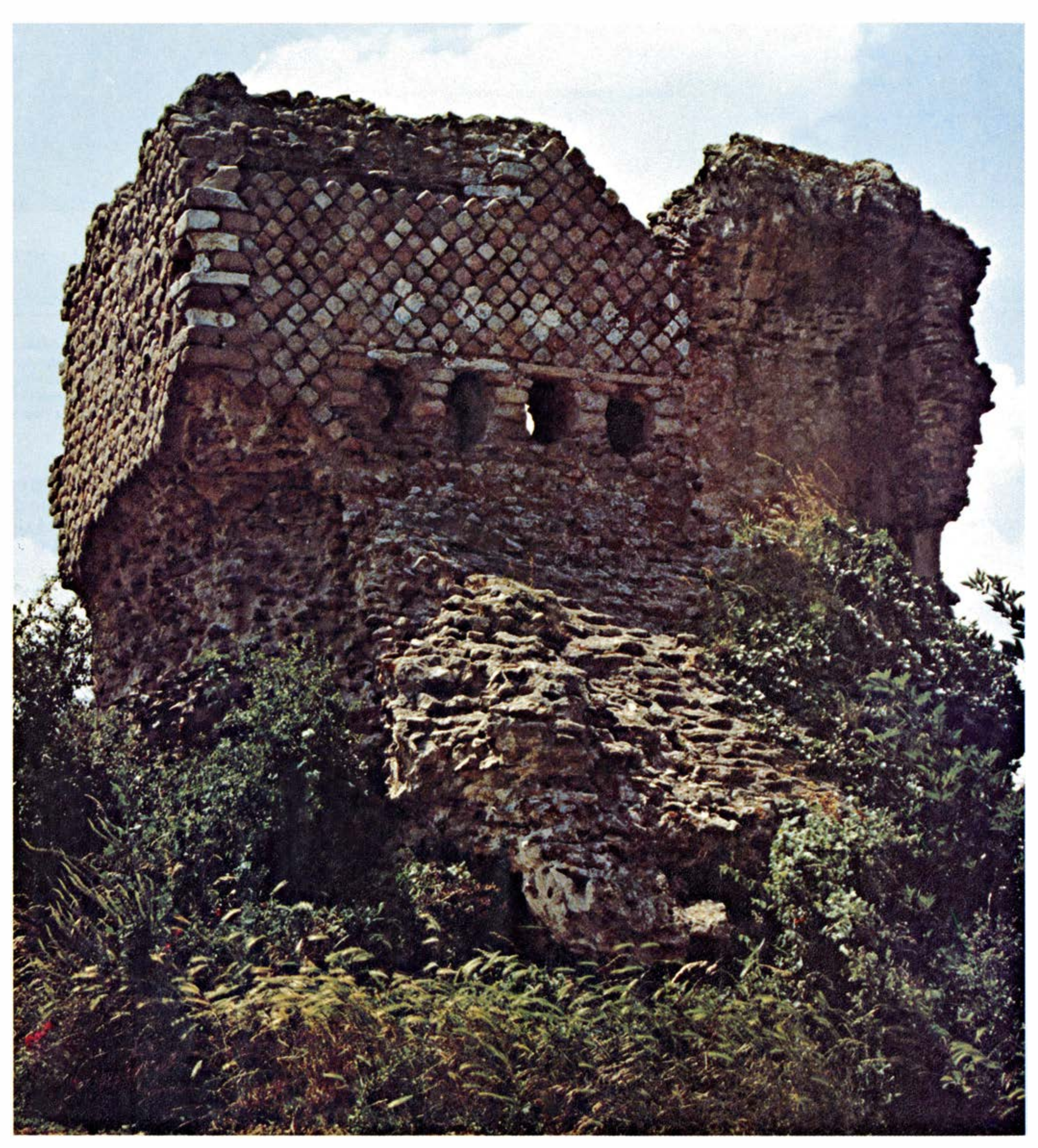
Las tuberías se fabricaban de plomo: curvaban una fina lámina alrededor de un núcleo de madera hasta formar un tubo; luego se soldaban los bordes y se retiraba el núcleo. Mediante este proceso se obtenía una tubería con una sección transversal piriforme u oval y con una "costura" continua en la parte superior. (Sorprendentemente, la "costura" no era ni mucho menos un punto débil: en el text de Belgrand falló la pared lateral antes que ella.) En otro orden, el proceso dificultaba la manufactura de grandes tuberías, por cuya razón el sifón romano consistía en una batería de varias pequeñas. Estas últimas venían a medir de 25 a 27 centímetros de diámetro exterior, siendo el grosor de la lámina de plomo de tres a cinco centímetros. Los restos encontrados en las ruinas indican que las tuberías se fabricaban en tramos de alrededor de tres metros.

Desde el depósito de cabecera, las tuberías descendían por una rampa corta hasta el suelo. Allí se enterraban a un metro de profundidad, ladera abajo del valle. Presumiblemente, lo

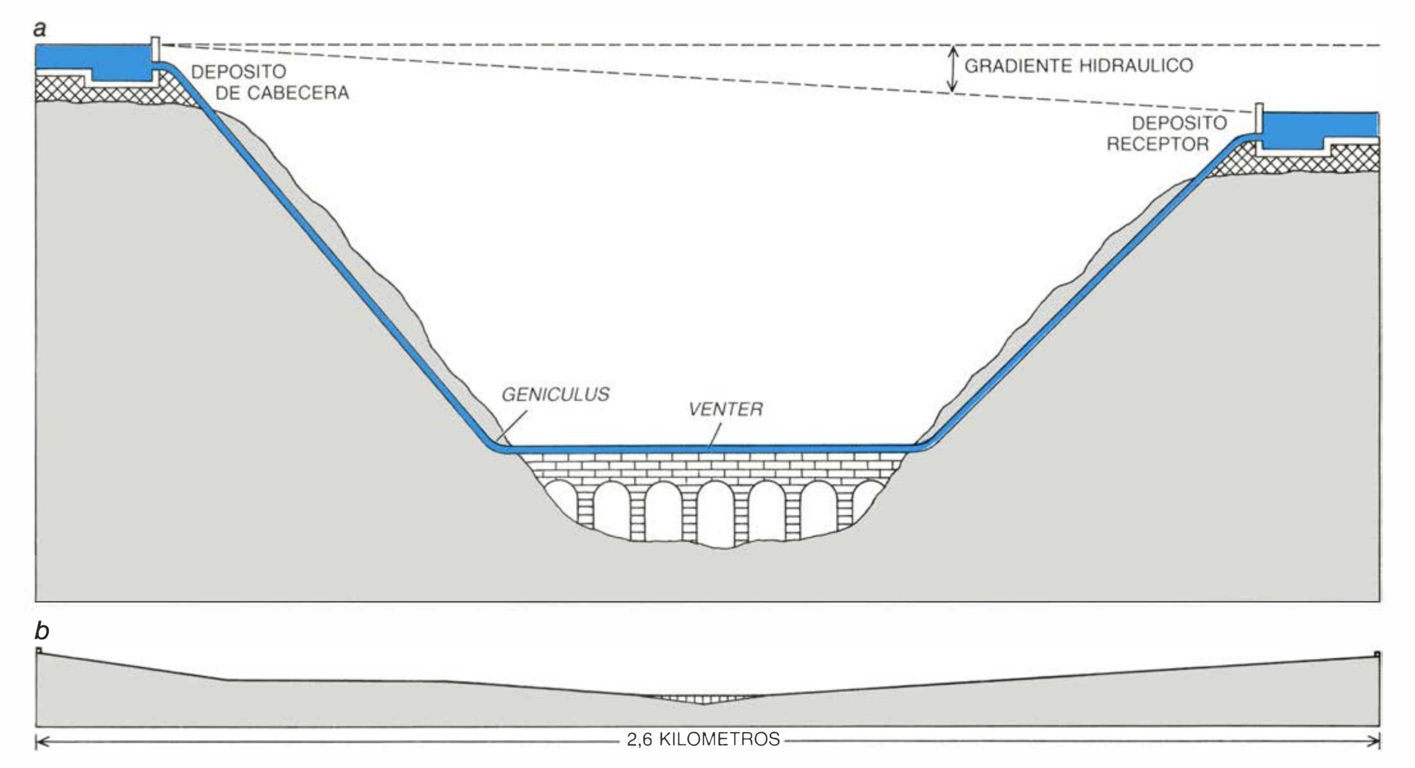
que se pretendía al enterrarlas era protegerlas de la acción humana; había otro beneficio adicional: no sufrían la tensión de la dilatación, producida por efectos del calor y la luz solar.

Llegado a la hondonada, el sifón podía seguir el perfil del terreno, pero se optaba frecuentemente por construir un puente bajo (*venter* en latín) para aplanar la base de la U, amortiguando así la caída del agua. El *venter* introducía un acodamiento pronunciado (*geniculus*) en cada extremo del puente, con la consiguiente tensión en las juntas de la tubería cuando el agua golpeaba el ángulo. Esto rebajaba la presión estática al reducir el desnivel (distancia entre el inicio y el final de la U).

Ni siquiera en los casos en que el *venter* se ha conservado bien, como en Beaunant, cerca de Lyon, su superficie anterior presenta vestigio alguno del conjunto de tuberías que en su día lo atravesaron. El *venter* de Beaunant era notablemente ancho (7,35 metros), bastante más de lo necesario para albergar nueve tuberías de 25 centíme-



1. DEPOSITO DE CABECERA Y RAMPA, que señalaban el arranque del sifón del Soucieu en el acueducto de Gier, uno de los cuatro que servían el Lugdunum romano (la moderna Lyon). El depósito distribuía el agua, que llegaba a través de un canal abierto hasta el final, en nueve tuberías pequeñas de plomo. Estas descendían, primero, por una rampa y, luego (enterradas a un metro de profundidad), seguían en galería subterránea por la ladera del valle; atravesaban un puente bajo (el *venter*) para ascender por la otra ladera hasta llegar al depósito receptor. Desde allí, el agua vertíase a un canal.



2. SIFON ROMANO representado y con la escala vertical exagerada (*a*). Se trata de un sifón invertido, porque el agua sigue el recorrido de una U en vez del trayecto ascendente (parecido a una ∩) del sifón genuino. La fuerza del agua adquiría un valor importante en el *geniculus* o codo, en ambos extremos del *venter*, por cuya razón los romanos reforzaban allí las tuberías empotrándolas en obra de fábrica. El *venter* amortiguaba la caída del agua desde el depósito de distribución hasta el valle. El depósito receptor debía ser algo más bajo que el de cabecera, porque la resistencia opuesta por las tuberías retardaba el agua; a la diferencia se le denomina gradiente hidráulico. Un perfil (*b*) del sifón de Beaunant, del sistema de Gier, muestra los gradientes reales.

tros. Probablemente esa mayor anchura permitía la existencia de vías de acceso para los trabajadores.

Desde el *venter*, las tuberías ascendían a través de un segundo *geniculus* hasta la cima del valle. El agua llegaba a un depósito receptor, similar al de cabecera, desde donde se la canalizaba en un acueducto normal. El depósito receptor era más bajo que el de cabecera, diferencia que se denomina gradiente hidráulico. El agua ascendía hasta su propio nivel, pero su paso a través del sifón se veía considerablemente retardado por la fricción creciente que sufría en su recorrido obligado por las nueve cañerías.

La superficie de contacto de las tuberías era mucho mayor que el área de un canal rectangular convencional, por la sencilla razón de que el canal no solía ir lleno y el agua de la superficie fluía sin fricción. Por tanto, si ambos extremos del sifón se hubieran instalado a la misma altura, el agua hubiera discurrido muy despacio, hasta el punto de bloquear y desbordarse por la boca de origen. Para asegurar la distribución de agua con el volumen y la velocidad adecuados, el sifón debía perder más altura al cruzar un valle que un puente común. El gradiente hidráulico de un sifón venía a decuplicar la pendiente normal del acueducto.

De la variedad topográfica a la que los romanos aplicaron el sistema de sifones, tenemos una muestra en los cuatro acueductos que abastecían a Lyon: Mont d'Or, Gier, Craponne y Brevenne. Hasta los acueductos cortos, con saltos de agua moderados, podían requerir varios sifones; la clave del número de sifones la daba la cifra de valles profundos que el acueducto debía salvar. Con un salto de agua de 90 metros, el acueducto de Mont d'Or contó con dos sifones; cuatro necesitó el acueducto de Gier, de pendiente suave, aunque su salto total cubría 110 metros. Craponne tenía un salto de agua brusco de 420 metros y dos sifones, uno de ellos de magnitud impresionante. El acueducto de Brevenne discurría en una alternancia gradual de cascadas y planicies y, aunque caía un total de 350 metros, sólo necesitó un sifón.

Más instructivo resulta, si cabe, comparar sifones entre sí. Los dos mayores del sistema de Gier se encuentran en Soucieu y Beaunant. El primero se extiende a lo largo de 1,2 kilómetros por 93 metros de profundidad; el de Beaunant mide 2,6 kilómetros de longitud por 123 metros de profundidad. Los dos compartían una pérdida de altura de unos 9 metros, lo que significaba que el de Soucieu, de menor longitud, poseía un mayor gradiente hidráulico. En el acueducto de Craponne, hay signos que indican la existencia de un gran sifón, de seis kilómetros de longitud, que caía unos 100 metros por debajo del gradiente hidráulico. Apenas si se han conservado rastros en el lugar y los signos indicadores son de orden topográfico: se sabe que el acueducto cruzaba el valle, y siendo éste demasiado ancho y profundo para un puente, tuvo que trazarse un sifón.

Para las cifras que se barajaban en las antigüedad, el volumen de agua repartida por los cuatro acueductos de Lyon no revestía carácter extraordinario. Se ha estimado en 80.000 metros cúbicos diarios, en tanto que el sistema que servía a Roma aportaba entre 700.000 metros cúbicos y 1.000.000 por día. (Las cifras del consumo de agua en la antigüedad nos resultan exorbitantes hoy, pero en aquellos tiempos raras veces se usaban grifos y el agua corría continuamente. El flujo resultante mantenía las alcantarillas permanentemente llenas.)

Como obra de ingeniería, la magnitud de los sifones merece aún el respeto de los expertos. La extensión total de los nueve sifones del sistema de Lyon cubría unos 16,6 kilómetros. A razón de nueve tuberías cada uno, esto representaba 150 kilómetros de tubería –suficiente para salvar la distancia de Roma a Nápoles, o de Barcelona a Lérida. En su realización se invirtieron

entre 12.000 y 15.000 toneladas de plomo, una empresa monumental en minería y transporte. Este sistema de conducción estaba sometido a presión en todos sus puntos, en ocasiones de hasta 12 atmósferas (12 kilogramos por centímetro cuadrado). Sin duda el sistema sufría algunas pérdidas, pero funcionaba y cubría los valles llegando mucho más lejos que los mayores viaductos y puentes romanos.

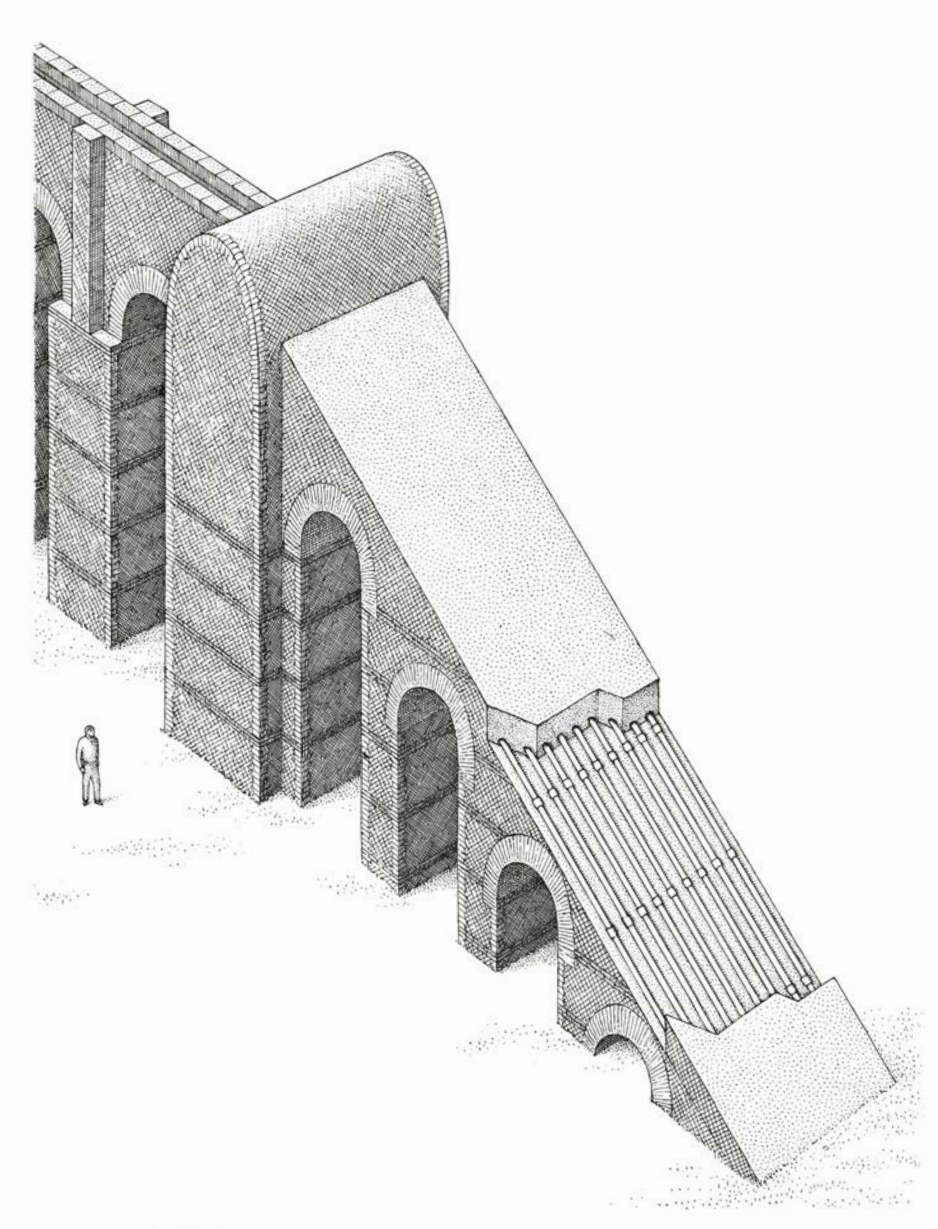
El agua ascendía hasta su propio nivel; pero, además, los ingenieros romanos debieron contar con otras tres fuerzas: resistencia de las tuberías, presión estática y pérdida de agua. En primer lugar, la fricción de las tuberías demora el agua, de tal manera que el sifón debe perder altura para mantener la fluidez. Segundo, la presión estática dentro de una tubería depende de la profundidad de la misma por debajo del nivel natural del agua, es decir, de la columna vertical de agua que va a sostener. La presión estática se crea por la simple presencia del agua y se ejerce igualmente en todas direcciones; la presión permanece constante esté quieta el agua o se mueva.

Tercero, el agua experimenta una pérdida de carga inercial sólo cuando discurre y únicamente en los codos de la cañería. Allí la pérdida de carga se produce en una sola dirección: hacia el exterior de la curva. La segunda fuerza opera cada vez que el sifón está lleno y las tres actúan en el caso exclusivo de que el sifón esté lleno y en funcionamiento.

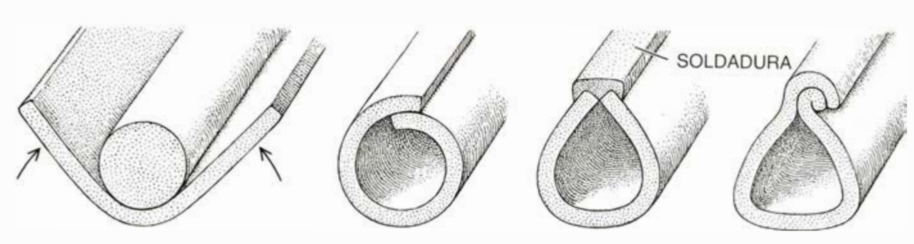
De vez en cuando, había que drenar el sifón para su reparación o limpieza. La pérdida de carga inercial se convierte en una fuerza decisiva a la hora de volver a llenar la tubería, operación potencialmente peligrosa. El agua ha de entrar gradualmente hasta que se llene la cañería; si las compuertas simplemente se abren de par en par, el agua -golpeando sin control en la primera curva que sigue al declive- puede destrozar la tubería. A la inversa, el corte del agua previo al drenaje debe realizarse gradualmente, porque una compuerta o válvula cerrada de repente puede generar un "golpe de agua", una ola de choque retransmitida a lo largo de la columna de agua detenida con brusquedad. Esta fuerza dañaría también gravemente la tubería.

No sabemos hasta qué punto los romanos conocían estos principios; los aplicaron evidentemente de forma empírica, porque los sifones se construyeron y funcionaron. Sin embargo, si se pretende hallar una formulación explícita de la teoría, los escritos antiguos resultan desalentadores. Sexto Julio Frontino, nombrado comisario de aguas de Roma en el año 97 D.C., cuyo tratado sobre el sistema aún se conserva, no menciona los sifones, por la probable razón de que no encerraran mayor interés para la capital romana. Vitrubio (Marco Vitrubio Pollio) ofrece, en el libro 8 de *De Architectura*, una descripción que constituye el único informe escrito sobre el tema.

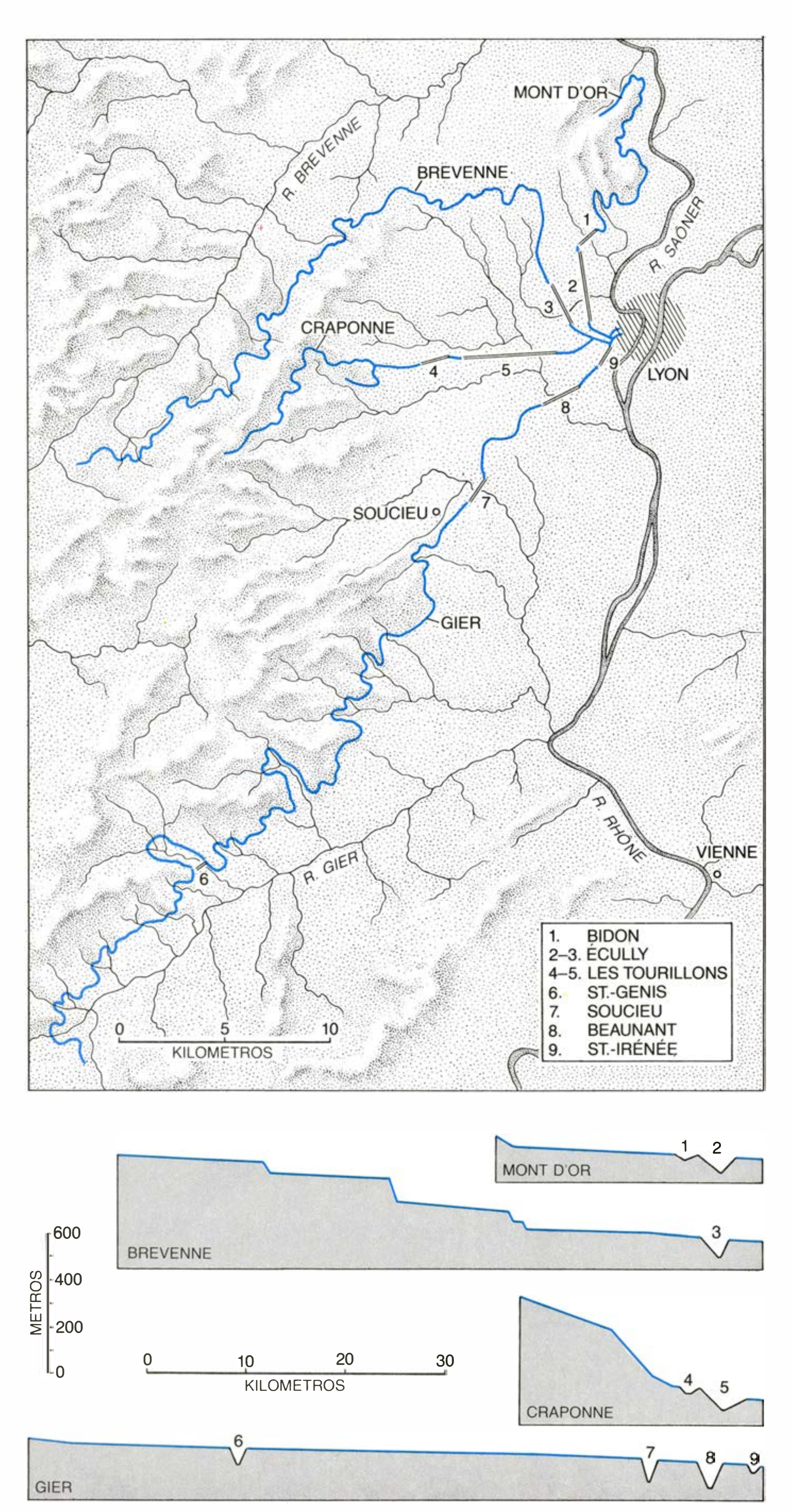
Vitrubio se muestra claro en algunos puntos. Reconoce la necesidad de tomar precauciones en el drenaje y llenado del sifón y recomienda que, para resistir la pérdida de carga inercial en las curvas, las tuberías deberían empotrarse en grandes masas de fábrica para



3. RECONSTRUCCION del arranque de un sifón, realizada por Waldemar Habery, del Rheinisches Landesmuseum de Bonn. El depósito de cabecera y las tuberías de la rampa se protegían con un recubrimiento de fábrica. Las tuberías medían tres metros de longitud y de 25 a 27 cm de diámetro.



4. SE PREPARABAN LAS TUBERIAS DEL SIFON curvando una hoja de plomo alrededor de un núcleo de madera. El núcleo se retiraba; la junta, en la parte superior, se martillaba o soldaba para producir un cierre hermético, tal como se ilustra. La sección transversal de las tuberías era oval o piriforme.



5. EL SISTEMA DE LYON comprendía cuatro acueductos: Mont d'Or, Brevenne, Craponne y Gier, con un total de nueve sifones. El total venía determinado por el número de valles profundos que cada acueducto tenía que cruzar. (Si el valle se podía atravesar con un puente de una altura inferior a 50 metros, los romanos optaban por este medio.) En la parte inferior, se aprecian los perfiles de los acueductos del sistema de Lyon. Los números correspondientes a los nombres de los sifones aparecen en el mapa indicando la localización de cada sifón. El sistema distribuía 80.000 metros cúbicos de agua diarios.

su refuerzo. Pero andaba errado en los principios básicos y posiblemente nunca entendió bien el funcionamiento del sifón.

En ninguna parte de su exposición sobre hidráulica de sifones es más palmario su grado de confusión que en la frase siguiente "Etiam in ventre colliviaria sunt facienda per quae vis spiritus relaxetur"; la traducción no encierra mayor dificultad: "En el fondo del sifón debemos colocar colliviaria para liberar la presión". La interpretación resulta punto menos que imposible, porque el latín es claro pero lo que dice carece de sentido.

Hay dos problemas. Primero, el término *colliviaria*; no aparece en ningún otro texto latino, que nos permitiría deducir, a través del vocablo, cómo eran los dispositivos. Tenemos que adivinarlos por el contexto.

El segundo problema es la referencia a la presión del aire. Las tuberías modernas suelen disponer de válvulas de ventosa para evitar la formación de bolsas de aire y por eso algunos autores han sugerido que esa era, precisamente, la función de *colliviaria*. Sin embargo, esa teoría olvida algunos aspectos.

En primer lugar, las bolsas de aire se forman en los puntos altos de la tubería, y es ahí donde se instalan las válvulas modernas, no "en el fondo". En segundo término, el sifón romano no tenía aire; la tubería estaba llena de agua. Además, el aire acumulado sale sólo a baja presión y el sifón romano estaba sometido a alta presión a lo largo de todo su recorrido. El aire forma bolsas por expansión cuando está sometido a baja presión y se aloja en los puntos más elevados del sifón, no en sus profundidades. Añádase que el sifón romano poseía una forma incorrecta: el aire de las burbujas discurriría simplemente hacia abajo, siguiendo la curvatura arrastrado por la corriente y se elevaría después para escapar por el extremo. En tercer lugar, como las bolsas de aire se forman por baja presión y son, por tanto, vacíos parciales, las válvulas de ventosa cumplen la función de igualar presiones, admitiendo aire del exterior.

La ausencia de aire en un sifón invertido ha llevado incluso a los comentaristas a suponer que Vitrubio se estaba refiriendo a una válvula que no liberaba aire, sino presión de agua. Pero esta suposición es todavía peor. Aunque nuestros antepasados hubieran sabido diseñar una válvula con resorte o contrapeso que se abriera bajo una presión establecida, no habría habido forma de

reducir la presión estática (salvo cambiando el curso del sifón para reducir su profundidad) y, por tanto, la válvula habría permanecido siempre abierta, funcionando no como tal válvula, sino como un orificio de la cañería.

En suma, no había aire en el sifón ni forma de reducir la presión del agua. La explicación más probable de los *colliviaria* es que se tratara de llaves de drenaje o boquetes de acceso para la limpieza de la tubería, mediante algún dispositivo de tracción quizás. El agua de las ciudades romanas solía ser dura y las incrustaciones en los acueductos constituían la norma diaria. Había que proceder a su continuo desincrustado y limpieza, si se quería evitar la obstrucción del canal. Estos depósitos se acumularían sobre todo en las estrechas tuberías del sifón, de frecuente limpieza o sustitución.

Los griegos conocieron y usaron también los sifones; el mejor conocido de la antigüedad es, sin duda, el sifón de Pérgamo, de gran tamaño, en el Asia Menor. Data de los tiempos del reinado del monarca helenista Eumenes II (197-159 a.C.), claramente prerromano. Consistía en una conducción única de tres kilómetros de longitud que alcanzaba una notable profundidad: 190 metros. El agua del sifón generaba una presión estática de unas 19 atmósferas.

Este sifón veló, durante años recientes, la verdadera cuestión. Puesto que los romanos, más numerosos, cayeron en el olvido y apenas si se habían estudiado, el sifón de Pérgamo creó la errónea impresión de que los griegos eran más avanzados en teoría hidráulica y mejores ingenieros incluso, capaces de crear potentes tuberías para resistir la presión allí donde los romanos no las pudieron conseguir.

Sabemos ya que ésa era una falsa impresión. Cuando se compara la profundidad de los mayores sifones romanos con la altura de sus puentes más elevados, se comprueban las grandes proporciones de los primeros, que generaban, pues, una alta presión estática en sus tuberías; ello descarta la creencia según la cual los romanos trataron por todos los medios de evitar la presión. Antes bien, habría que afirmar que instalaron tuberías (en vez de canales abiertos o acueductos-puentes) sólo cuando las presiones fueron altas.

Cabe extraer una segunda conclusión todavía. Comparando las alturas relativas de sifones y puentes se evidencia que no se superponían. Los sifones se instalaban allí donde los puentes se de-



6. *VENTER* DEL SIFON DE BEAUNANT, visto desde la localización (al fondo) del primer *geniculus*, donde las tuberías salían a la superficie y cruzaban el hondón del valle. El *venter* era mucho más ancho (siete metros) de lo necesario para transportar nueve pequeñas tuberías; probablemente esta mayor anchura permitía la existencia de pequeñas vías de acceso para los trabajadores. Por ser el agua dura era preciso practicar una limpieza asidua.

tenían, a una altura aproximada de 50 metros. Por debajo de esta cota, los romanos salvaban el valle levantando un puente y, por encima, construían un sifón. Se puede inferir, por tanto, que se inclinaban por los puentes y sólo recurrían a los sifones como una segunda opción, cuando sus ingenieros no podían construir un puente o viaducto suficientemente alto. Pensaban que 50 metros era la máxima altura que un puente podía alcanzar sin riesgo.

El hecho de que los romanos tendieran sólo los sifones complicados y evitaran los más sencillos parece indicar que no eran los problemas de ingeniería lo que les impedía recurrir con mayor frecuencia a los sifones. La causa más probable es la propuesta por Norman A. F. Smith, del Imperial College of Science and Technology de Londres, quien ve en ello una razón de índole económica: los sifones les costaban a los romanos más que los puentes. La obra de sillería resultaba barata, en especial si las piedras se extraían de una cantera del lugar, y lo mismo sucedía con los ladrillos y el cemento. El plomo era barato también: el mundo antiguo lo obtenía en abundancia, como subproducto derivado del refinado de la plata.

Más aún, la intoxicación por plomo no constituía, por lo que parece, ningún problema, a pesar de que ciertos investigadores han querido ver en el uso de las tuberías de plomo una causa de la infertilidad y otros aspectos de la decadencia y hundimiento romanos. No les era ajeno y conocían semejante peligro. Es más, con el flujo continuo y la ausencia de grifos, el agua permanecía en las tuberías muy poco tiempo. Por otro lado, la gruesa costra de carbonato de calcio en las tuberías actuaba de aislante; el agua nunca llegaba así a tocar el plomo una vez que la tubería había permanecido en servicio durante algún tiempo.

El problema del plomo era su transporte. El costo y el enorme trabajo de acarrear 15.000 toneladas hasta los sifones de Lyon fueron, tal vez, la razón más poderosa para no repetir la experiencia más de lo necesario.

El proceder actual es justamente el inverso gracias al arrabio, material que no podía obtenerse en los hornos de la antigüedad porque la temperatura máxima que alcanzaban no permitía fundirlo. Todo el hierro antiguo era, por tanto, hierro forjado que no podía ser transformado en tuberías. Nuestras cañerías de hierro fundido abaratan la fabricación de un sifón, menos onerosa que la construcción de un puente. Recuérdese que en el norte de Africa los franceses solían acarrear el agua a las ciudades costeras a través de los antiguos acueductos romanos, a veces renovándolos, y con frecuencia, en las zonas donde los romanos salvaban un valle con un acueducto-puente, los franceses tendían un sifón.

La lección es meridiana. Los romanos no construyeron los elevados arcos de Pont du Gard como mera exhibición de poder (aunque disfrutaron de su majestuosidad), ni porque sus ingenieros carecieran de la visión hidráulica de los griegos; menos aún fue ésta la causa por la que no pudieran fabricar tuberías más resistentes. El factor determinante fue el costo; y ello explica por qué vemos hoy, a lo largo de los acueductos romanos, arcos de ladrillo donde debiéramos admirar la audacia técnica del sifón.

Juegos de ordenador

Artefactos analógicos que resuelven múltiples problemas y suscitan una retahíla de cuestiones

A. K. Dewdney

Hace exactamente un año, una colección de artilugios analógicos presentados en estas mismas páginas desencadenó una avalancha de artefactos similares, propuestos por lectores inspirados. Todavía hoy estoy desembarazándome de un inmenso revoltijo de planchas de madera, tiras de goma, cordeles, bolas de poliestireno, pelotas, peceras, lastres de plomo, cajitas, tuberías y llaves de paso. En el proceso he podido –así me lo parece– ir apreciando cuáles son los mejores de entre estos artilugios, y los he dispuesto en una especie de galería, por la que invito al lector a pasearse.

Los aparatos analógicos son dispositivos mecánicos que resuelven problemas específicos, en virtud de que su construcción o comportamiento es análogo al de los elementos del problema. Por ejemplo, en el artículo de *Juegos de ordenador* de agosto de 1984, se describía el DAS ("Dispositivo analógico a spaghetti"). Para dar representaciones analógicas de los números se utilizan spaghetti crudos de diversas longitudes. Para ordenar los números por valor decreciente, se recogen en posición vertical todas las varillas de spaghetti, formando una gavilla, y se las deja caer de punta, de un golpe seco, sobre la superficie de una mesa. Extraigamos la varilla más prominente. Eligiendo siempre la más larga de las varillas restantes, se obtendrá la serie ordenada, en sucesión decreciente, de los números. Además del DAS di a conocer artilugios para hallar caminos de longitud mínima, envolventes convexas y árboles minimales. Llegué incluso a proponer un artefacto para la descomposición factorial de números, formado por espejos y un haz de rayos láser.

En esta última colección se incluyen varios artilugios, tan nuevos como ingeniosos, ideados para resolver problemas de estadística, teoría de redes, álgebra y aritmética. Al salir de la galería volveré a examinar algunas cuestiones importantes que la posibilidad de computación analógica suscita; por ejemplo, ¿qué precisión tienen las computadoras analógicas, y cuánto tiempo necesitan realmente para ejecutar el cómputo? ¿Habrá máquinas analógicas capaces de desbancar a las digitales?

El primero de los nuevos artilugios resuelve ciertos problemas de estadística gracias a un tablero de madera, anillas elásticas de goma, clavos y una varilla lisa y rígida. Un conjunto de datos, representados en papel milimetrado por una nube de puntos, puede mostrar una perceptible tendencia a la alineación. De darse realmente una relación lineal que gobierne la posición de los puntos de la nube, ¿cuál sería la línea recta que mejor pusiera de manifiesto tal relación? El artefacto propuesto por Marc Hawley, de Mount Vernon, Indiana, da una posible respuesta.

Dibujemos los puntos representantes de los datos sobre una superficie lisa y plana de madera, y clavemos a medias un clavo en las posiciones señaladas por los puntos. Seguidamente, hagamos pasar la varilla por dentro de cierto número de anillas de goma, una por cada clavo. Situemos más o menos la varilla en su lugar y pasemos cada anilla por uno de los clavos. Al dejarla suelta, la varilla tiembla y se bambolea por un momento, quedando enseguida en posición de equilibrio [*véase la figura 1*].

En la posición de equilibrio, la energía total del sistema es mínima: así pues, la suma de las distancias desde los clavos hasta las varillas ha de ser mínima también. Si el problema planteado es hacer mínima dicha suma, la posición final de la varilla nos dará la línea recta que mejor se adapta a los datos, por este concepto. Las fórmulas de regresión lineal habituales en estadística no se fundan en esta suma, sino en la suma de los cuadrados de las distancias. El artefacto de Hawley computa algo no menos complicado.

Jos Wennmacker, de Nimega, Holanda, propone un artefacto a base de cordeles. Supongamos que se desee saber cuál es el más largo camino que un mensaje dado puede recorrer en una red de comunicaciones ramificada, como si fuera un árbol. En matemática combinatoria, tal ruta se llama *diámetro* del árbol. Para hallar el diámetro, Wennmacker reconstruye el árbol, anudando entre sí un modelo analógico, construido con trozos de cordel. Cada cordel es representación, a escala, de una determinada línea de comunicación de la red. Bastan dos pasos sencillos para llevar a término el cómputo. Alcemos la malla de cordel por uno cualquiera de sus nudos, y dejémosla pender libremente. Tomémosla de nuevo, esta vez por el nudo más bajo, y dejémosla pender otra vez. El camino más largo correrá desde el nudo más alto hasta el más bajo [*véase la figura 2*].

En mi primer contacto con el artilugio de Wennmacker, mi reacción inmediata fue: "No puede ser así de fácil. Seguramente haya que repetir varias veces el proceso de tomar el nudo más bajo y dejar pender la red". Sin embargo, no es así. ¡Gloria en esta sección a la demostración más elegante!

En el artículo de hace un año manifesté que el problema de hallar la senda más larga contenida en una red arbitraria es lo que en teoría de computabilidad se conoce por problema NP-completo. Significa ello que es imposible en la práctica resolver el problema mediante un ordenador digital, en tiempos razonables. ¿Habremos demostrado finalmente la superioridad de un dispositivo analógico sobre sus parientes digitales? No del todo. Resulta que si la red es un grafo arbóreo, hay algoritmos digitales capaces de hallar rápidamente la ruta más larga.

La sala siguiente de nuestra galería de artilugios analógicos contiene un artefacto engañosamente simple, propuesto por M. Laso, del Instituto Federal de Tecnología de Zurich, Suiza. Nos encontramos aquí con una barra de perfil de aluminio, fuertemente sujeta entre las mordazas de un tornillo de banco. La barra porta una aguja en un extremo [*véase la figura 3*]. La aguja está superpuesta a una escala finamente graduada.

Antes de entrar nosotros en la sala, alguien amordazó la barra en el tornillo de banco, ajustándola de modo que sobresaliesen tres metros, exactamente. En el tornillo, la barra está cuidadosamente nivelada y horizontal. En el extremo, allí donde sobresale la aguja, la barra sufre un leve desplome. Al acercarnos a la escala, observamos que la

aguja da una lectura de 81. La cifra es la cuarta potencia de 3.

De acuerdo con la teoría de elasticidad, la deflexión de una barra que sólo soporta su propio peso es proporcional a la cuarta potencia de su longitud. Laso señala igualmente que el mismo artilugio podría usarse para calcular la raíz cuarta de cualquier número, sin más que hacer deslizar la barra entre las bocas del tornillo hasta que la aguja señalase en la escala el número a radicar. Usando una escala distinta cabe incluso calcular cubos y raíces cúbicas. Con la barra anclada en posición fija, la aguja ha de señalar cero. A continuación se coloca en el extremo de la barra un peso proporcional a un número dado. En este caso, la teoría de elasticidad predice que la deflexión de la viga es proporcional a la tercera potencia del peso.

En la misma sala podemos ver una plancha de madera que porta un mapa, y a través de la cual se han taladrado tres orificios. Por los agujeros pasan sendos hilos finos. Abajo, colgando de los hilos, pesas; arriba, sobre la plancha, los hilos están sujetos a una anillita de metal [*véase la figura 4*]. J. H. Lueth, de la United States Metals Refining Company, de Carteret, Nueva Jersey, llama GANGA (*G*alga *A*nalógica de *G*ran *A*cería) a su disposición. El problema que GANGA resuelve es el de hallar la localización óptima de una acería, a fin de que los costos de transporte de los tres principales ingredientes sea mínimo. Sean *A, B* y *C* los costos por kilómetro de transporte de una tonelada de mena, carbón y fundente. Si las distancias de la planta a las fuentes de estas materias primas son, respectivamente, *a, b* y *c*, el costo total del transporte de las primeras materias más importantes será $aA + bB + cC$. Los tres orificios perforados en la plancha corresponden a los emplazamientos geográficos de las tres fuentes de aprovisionamiento. Una vez enfilados los tres hilos por los orificios, y sujetos por arriba a la argolla, se cuelgan de ellos sendos pesos, proporcionales a *A, B, C,* de los hilos correspondientes. Al dejarla libre, la argollita se desliza rápidamente, y queda en posición, revelando de este modo sobre el mapa la posición óptima de la planta siderúrgica.

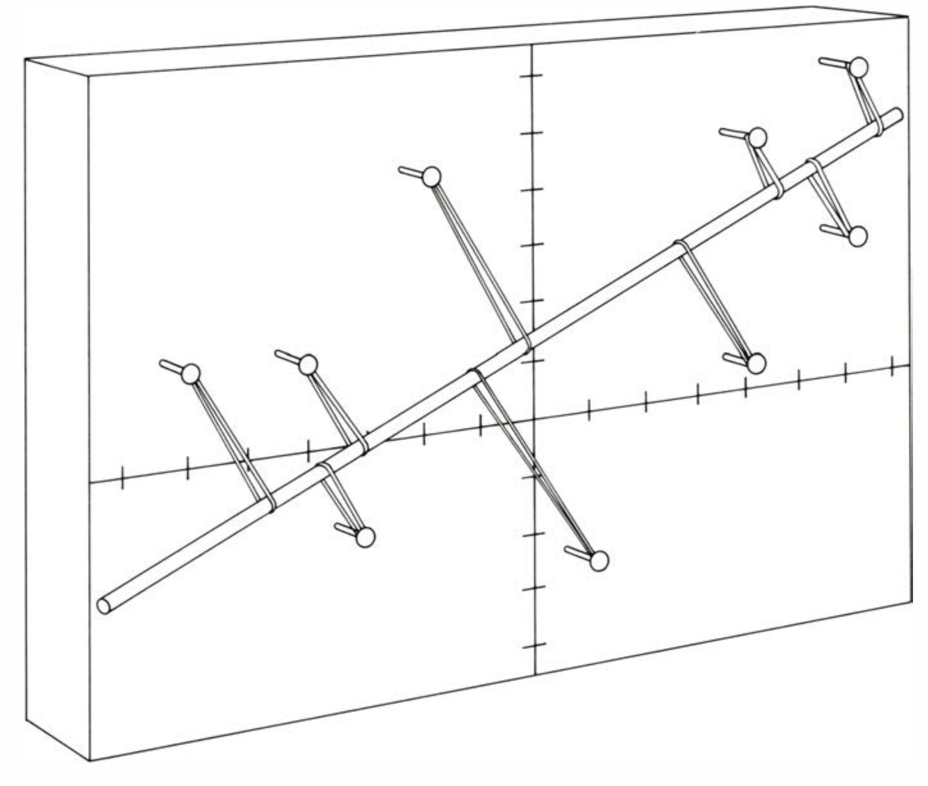
La siguiente sala de nuestra exposición está ocupada por una multitud de artilugios de vidrio y de metal; en el aire se percibe un denso aroma de agua jabonosa.

Fue Dale T. Hoffman, del Bellevue Community College en Bellevue, Washington, quien nos hizo prestar atención a cierto número de estas acuosas computadoras. Una película jabonosa situada entre un cristal y una superficie escalonada nos proporciona un modelo analógico de un rayo de luz al pasar de un medio transparente a otro: la película es recta sobre ambos niveles, pero en el escalón, donde cae, también se dobla abruptamente [*véase la figura 5*]. Si alteramos la altura del escalón entre los niveles, cambia el ángulo de la película jabonosa, como si los medios simulados hubiesen variado su índice de refracción.

En forma algo más compleja, este mismo sencillo artilugio puede resolver también un problema de trazado de un oleoducto. Imaginemos que el terreno que separa dos ciudades está subdividido en diversas regiones, a cada una de las cuales corresponde un coste específico de construcción del oleoducto. Aquí el terreno es pantanoso, allá, elevado y, a un costado, densamente boscoso. A fin de dar un modelo de este problema, Hoffman propone representar las regiones por superficies planas, recortadas según el perfil de la zona. Se sitúa después cada superficie a una altura proporcional al coste de construcción que le corresponda. Se inserta una clavija en el emplazamiento de cada ciudad, se pone una cubierta de cristal sobre el artefacto y todo el montaje se sumerge en una solución jabonosa. Se forma una película que se dobla por dos puntos, y que indica el trazado de uno de los oleoductos de costo mínimo posible. Sería muy grato examinar otros cuantos artilugios de Hoffman [véase "Bibliografía"], pero nos dirigimos ahora hacia ciertos exóticos juegos de cristalería.

Vemos, conectados por sus bases mediante tubos, cinco cilindros graduados de cristal. Una llave interrumpe el libre paso de agua desde cada cilindro hacia el siguiente. Al llenar los cilindros hasta diferentes niveles, que representan cinco números distintos, nada sucede. Pero al abrir todas las llaves de paso, el agua queda en libertad de buscar su propio nivel, que constituye, en este caso, la media aritmética de los cinco números "vertidos" en el dispositivo. El artilugio procede de Sartore Marco, de San Remo, Italia.

El último de los artefactos que describiré con detalle lo sugirió Peter F. Ash, de la Universidad de St. Joseph, de Philadelphia, Pennsylvania. Es capaz de resolver ecuaciones de tercer grado, y puede perfeccionarse para que resuelva ecuaciones polinómicas de grado muy superior. Las ecuaciones de tercer grado, o cúbicas, tienen cuatro términos ax^3, bx^2, cx, d. Estos cuatro términos se suman, y su suma se iguala a 0. Para resolver tal ecuación es preci-



1. Artefacto para hallar la recta que más se ajusta a una nube de puntos

so hallar un valor de x que, sustituido en lugar de esa letra, produzca verdaderamente una suma de 0.

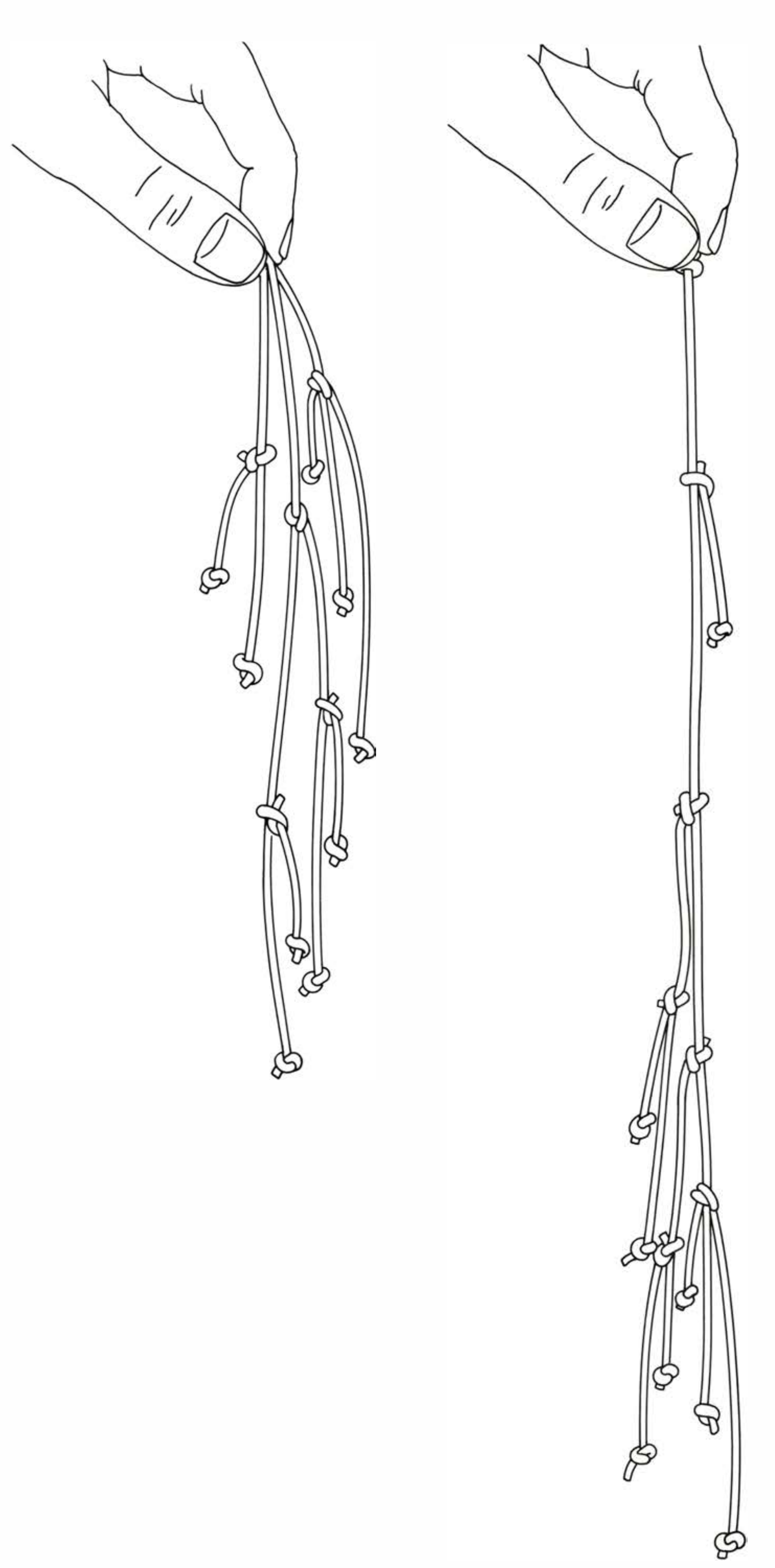
El artilugio que ahora tenemos ante nosotros [*véase la figura 5*] sirve para resolver una ecuación cúbica concreta. Consta de un gran depósito de agua, la cruz de una balanza, dos platillos y una variedad de sólidos, que representan los términos de la ecuación. Los sólidos tienen superficies de revolución, como si hubiesen sido torneados. El término x^3 está representado por un paraboloide. Al colgarlo con el vértice hacia abajo, y sumergirlo hasta la profundidad de x centímetros, el paraboloide desplaza un volumen de x^3 centímetros cúbicos. El término de segundo grado, x^2, está representado mediante un cono, que desplaza x^2 centímetros cúbicos. Mediante un cilindro podemos representar cx; con una esfera, d. La esfera está siempre sumergida.

Estos cuatro cuerpos penden de la barra de una balanza provista de platillos en sus extremos, a fin de que el fulcro caiga en el punto medio. La barra, o cruz, de la balanza está suspendida sobre un depósito de agua. El paraboloide se suspende a centímetros hacia la izquierda del fulcro cuando a sea negativo. En caso contrario, queda suspendido a centímetros hacia la derecha. La misma regla es aplicable a los otros tres sólidos.

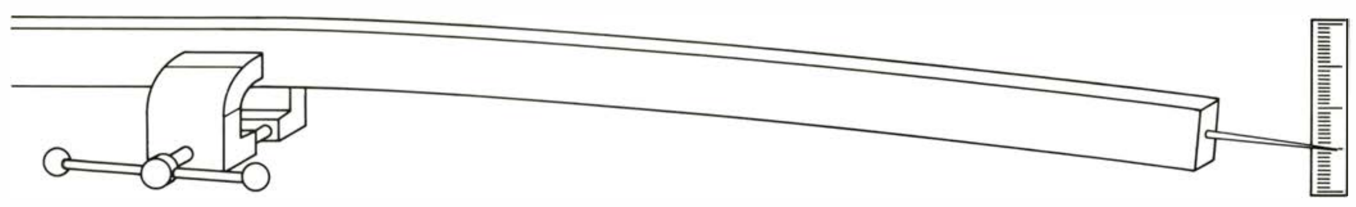
Para resolver la ecuación cúbica se mantiene nivelada la cruz, y se llena el tanque de agua justo hasta que tres de los sólidos comiencen a rozar la superficie. El cuarto sólido, la esfera, ya se encuentra sumergido. Al liberar ahora la cruz, es probable que uno de los brazos sea más pesado que el otro. En consecuencia, se añaden pesas a uno de los platillos, hasta que la cruz quede en equilibrio y no sea preciso sujetarla para mantenerla horizontal. El nivel del agua que haya en ese momento se marca como "nivel cero".

Hasta el momento no he hecho sino describir las fases preparatorias. Ahora viene la solución analógica. Conforme vamos lentamente llenando el agua del tanque, la cruz se desequilibra, aunque un poco después vuelve a equilibrarse. Inmediatamente se cierra el agua, y se registra el nuevo nivel de equilibrio. La diferencia entre el antiguo y el nuevo nivel es el valor de x que verifica la ecuación. Evidentemente, podría suceder que la ecuación careciera de soluciones. En tal caso podríamos llenar el tanque hasta el borde, y la cruz seguiría estando desequilibrada.

¿En qué se basa el funcionamiento



2. Artilugio de cordel para determinar la ruta más larga en una red arborescente



3. Artefacto que calcula la cuarta potencia de la longitud de una barra

de este admirable artefacto? Según el principio de Arquímedes, un cuerpo sumergido sufre una pérdida aparente de peso, que es proporcional al volumen sumergido. El efecto de la inmersión sobre la cruz de la balanza queda multiplicado por la distancia entre cada sólido y el fulcro. Así pues, el nuevo equilibrio se alcanza solamente al satisfacerse la ecuación por un nuevo nivel de agua.

Sería maravilloso poder duplicar la extensión de este artículo y dar cabida a descripciones completas de todos los artilugios de la exposición. Nos resignaremos a mencionar unos cuantos más.

Uno de ellos es una alternativa, tan curiosa como poco práctica, al DAS. La sugirió Michael Gardner, de Findlay, Ohio; la llamaremos ORDAGO (*ORD*enador *A G*as *O*il). Para funcionar, ORDAGO requiere tantos camiones (todos de la misma marca y características, y cargados por igual) cuantos números a ordenar. A cada camión se le surte de una cantidad de gasóleo directamente proporcional a cada uno de los números a clasificar. Después, cargados con lastres iguales (conductor incluido), el convoy de camiones parte a lo largo de alguna carretera poco transitada. Un camión adicional (con el depósito bien lleno) va siguiendo al convoy, y su conductor va anotando el orden en que los otros camiones han ido parándose el agotar el combustible. De este modo, los números quedan ordenados de menor a mayor.

A su vez, un artilugio para hallar caminos mínimos en una red, que presentamos en el artículo de agosto, construido entonces a base de cordeles, puede simularse mediante un circuito eléctrico sencillo, nos dice Stephen Fortescue, de Canoga Park, California. Se sustituye cada lado de la malla por un circuito compuesto por dos ramas en paralelo. Cada rama consta de un diodo zéner conectado en serie con un LED (diodo electroluminiscente), que hace de luz piloto. Normalmente, los diodos sólo conducen la corriente en una dirección y, por raro que parezca, en cada rama el diodo zéner y el LED están orientados en sentidos opuestos. A su vez, las ramas propiamente dichas están orientadas también en sentidos contrarios. No obstante, puede hacerse que los diodos zéner conduzcan la corriente en sentido contrario al de paso aplicando entre sus electrodos una diferencia de potencial adecuadamente alta. Fortescue sugiere elegir las tensiones de conducción inversa (llamadas también de ruptura, o de avalancha) en proporción directa a la longitud del lado que van a remplazar. Para hallar el camino más corto entre dos nodos, apliquemos entre ellos una tensión eléctrica cada vez mayor. Al principio nada ocurre pero, al aumentar lo suficiente el voltaje, súbitamente se encenderán los indicadores de la ruta mínima entre ellos.

Nadie ha dado con variantes ni alternativas que mejoren el método del anillo elástico para la determinación de la envoltura convexa de un conjunto de puntos del plano. Empero, Elio Lanzoni, de Módena, Italia, ha ideado un artilugio que determina el círculo circunscrito a la nube de puntos, o dicho de otro modo, el mínimo de los círculos capaz de contenerlos a todos. Para representar los puntos, Lanzoni taladra orificios en un tablero. Prepara después varios trozos de cordel, todos de la misma longitud, que ata en un solo nudo por un extremo, y hace pasar los extremos libres por los orificios, uno por cada uno. Los extremos inferiores se sujetan después a los correspondientes puntos de una pieza grande y plana de contrachapado. Al dejar colgando la plancha de madera contrachapada por debajo del tablero, el extremo común, donde los hilos están anudados, se cierne sobre el centro del círculo buscado. Al menos tres de los hilos estarían tensos. Esos son los radios del círculo.

Mi anterior promesa de tocar las serias cuestiones que la computación analógica suscita nació de una cierta inquietud por los artefactos en particular, y por el método analógico, en general. En respuesta al artículo de agosto, uno cuantos lectores expusieron comentarios críticos acerca de la velocidad de cómputo de los dispositivos explicados. Otros pusieron en duda su exactitud, y no faltaron quienes me desafiaron a definir exactamente qué entendía yo por computación analógica. Estas cuestiones nos llevan hasta el meollo mismo del problema de las relaciones últimas entre materia e información.

En el primer artículo sobre el tema que nos ocupa analicé ya las fases de pre- y post-procesado en la computación analógica. En la máquina DAS, por ejemplo, primero hay que cortar las varillas de spaghetti a las longitudes correspondientes a las cantidades a ordenar; tras lo cual, había que leer sus valores, midiendo las varillas de pasta. En casi todos los casos, ésta era la operación que más tiempo consumía. El proceso fundamental del cómputo queda plasmado en un golpe, un estirón, o un chasquido, expresión de haberse alcanzado un estado de equilibrio, es decir, la solución. En cierto sentido, no obstante, las fases de procesado son ajenas a la computación analógica. Es nuestro hábito de valernos de números a modo de moneda mental lo que nos hace exigir que entradas y salidas sean presentadas en dicha forma. Pero si por computación analógica entendemos un proceso físico, o un modelo idealizado de un proceso físico, tanto las entradas como las salidas del sistema habrán de tener también carácter físico. La computación digital padece de recíproca debilidad. ¿Qué ocurriría si para evaluar un sistema de cómputo digital tuviera yo antes que establecer lo rápidamente que podría convertir cierto número de magnitudes físicas en variables numéricas?

Seguramente sea preferible examinar el significado de la computación analógica sin preocuparnos, por el momento, de cómo ir y venir entre los dominios digital y analógico. ¿Cuál es, entonces, el reino de lo analógico? Tal vez sea preferible idealizar este reino en cierta medida, un poco a la manera del extraterrestre que hace ya bastantes años visitó nuestro planeta. El incidente se menciona en un libro, cuyo autor fue uno de mis predecesores en esta sección. El extraterrestre (a quien llama-

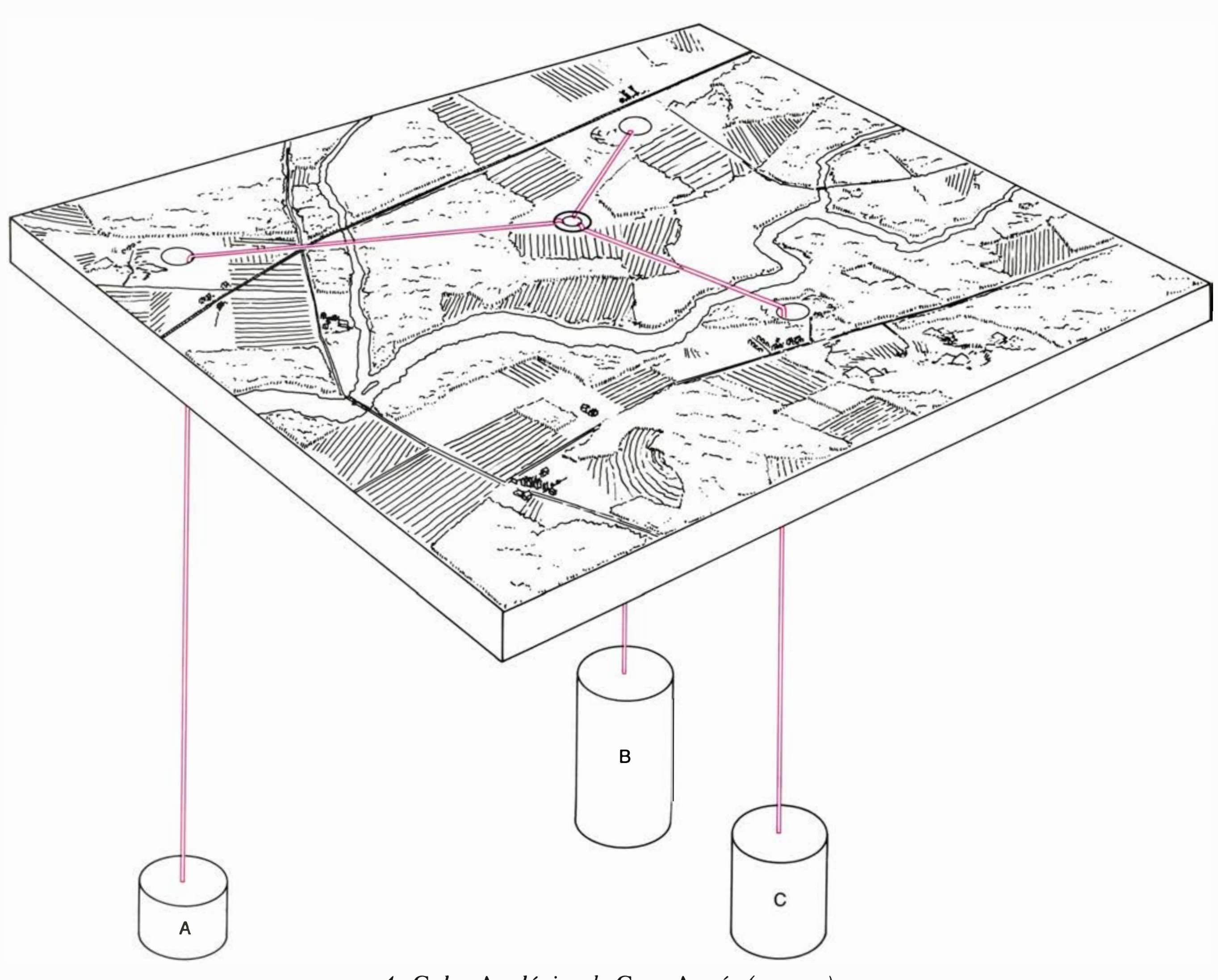
remos Marcian Gardner) aterrizó con su astronave y procedió a convertir todos los libros terrestres en un único número, inmensamente largo. En teoría, el proceso es sencillo: considerados como una larga ristra de palabras, los libros podrían igualmente considerarse secuencias de números. El extraterrestre se limitó después a anteponer al número un cero y una coma decimal, y trazar la más fina línea sobre una preciosa barra de durón que portaba en la nave. El trazo dividía la longitud de la barra precisamente en la razón expresada por el enorme número decimal. De este modo, la totalidad de la tradición escrita de la humanidad quedaba condensada en un trazo sobre una varilla.

Imaginemos, pues, que el reino de lo analógico esté formado por esta materia ideal, que obedece a leyes ideales de un espacio ideal. Está ese reino habitado por ecuaciones diferenciales, algunas de las cuales describen cosas absolutamente extraordinarias. Por ejemplo, hay ecuaciones diferenciales que describen una forma continua de máquina de Turing. La máquina continua es capaz de todo cuanto su homóloga discreta pueda hacer, y seguramente de mucho más. Unicamente dejaría yo ver tales ecuaciones a quienes se pregunten qué entiendo por computadora analógica en sentido ideal. La construcción de tal máquina a partir de componentes electrónicos probablemente tendría por efecto pérdidas críticas de exactitud y velocidad.

Anastasios Vergis, de la Universidad de Minnesota, y Kenneth Steigliz y Bradley Dickinson, de la Universidad de Princeton [véase "Bibliografía"] han creado un dispositivo aparentemente más cercano a la realidad que la máquina de Turing analógica. Compuesta exclusivamente por ejes, ruedas dentadas y levas, su máquina resuelve cierto problema de lógica, conocido por problema de trisatisfactibilidad: una expresión lógica está compuesta por tres cláusulas, suma cada una de tres literales. Cada literal es una variable lógica (x por ejemplo) o su negación (valga $\bar{x}$), y las cláusulas se multiplican a la manera del siguiente ejemplo:

$$(x + y + \bar{z}) \cdot (\bar{x} + \bar{y} + z)$$

¿Habrá algún modo de asignar a x, y y z valores de veracidad o falsedad, de suerte que la expresión completa sea verdadera? Si la expresión constara tan sólo de las dos cláusulas mostradas, la respuesta sería afirmativa. Supongamos que x sea verdadera, y falsa y z verdadera. Salta a la vista que ambas cláusulas contienen al menos un literal verdadero y, por tanto, la expresión completa resulta verdadera. Aunque presentado de este modo el problema parezca simple, es en realidad extraordinariamente difícil de resolver con algún nivel de generalidad. En realidad, tiene una propiedad aborrecida en



4. Galga Analógica de Gran Acería (GANGA)

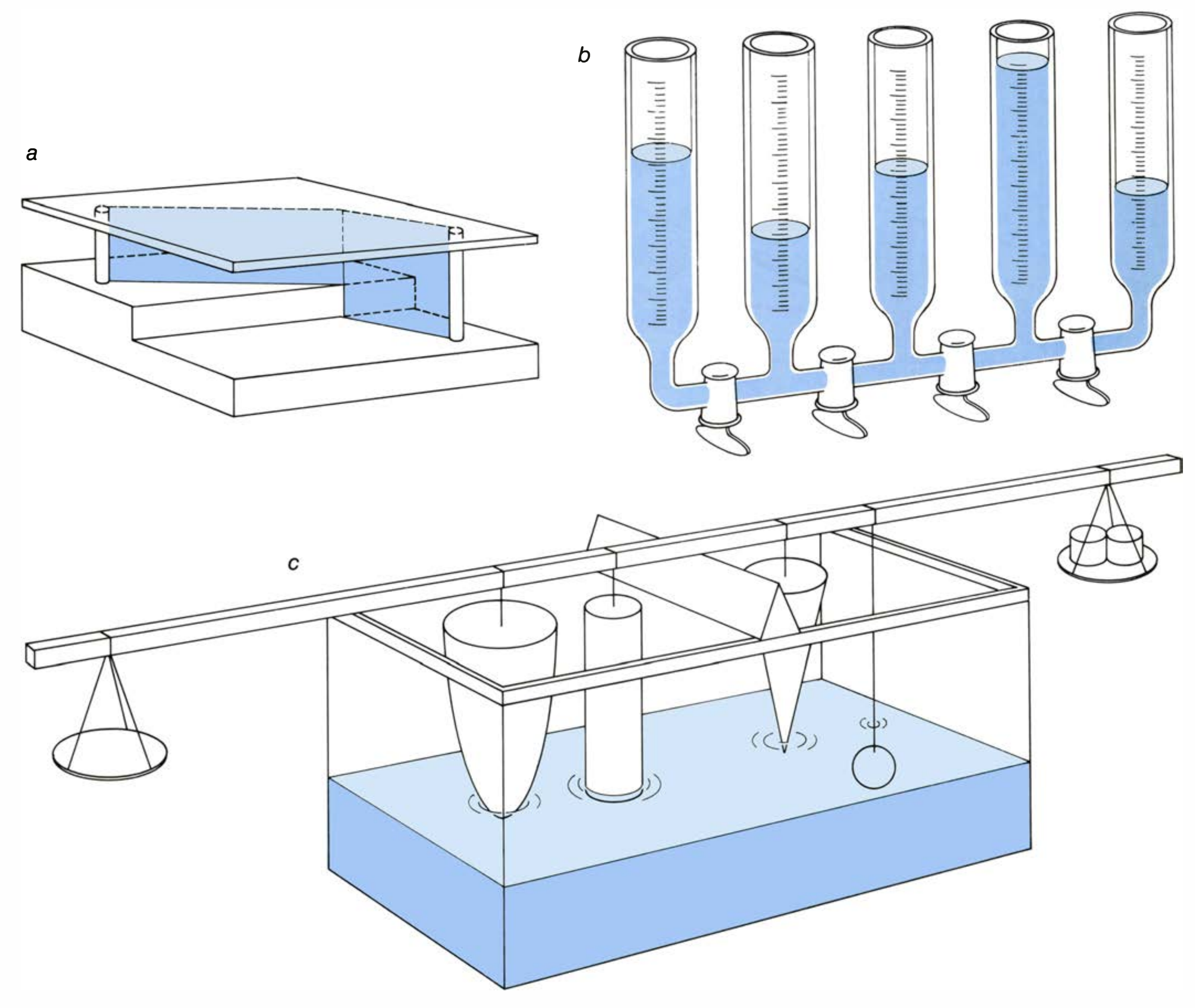
ciencias de cómputo, a saber, que es *NP*-completo: ningún algoritmo, ni conocido ni futuro, podrá resolver este problema con una tasa de crecimiento menor que la exponencial. Para satisfacer *n* cláusulas se requieren 2^n pasos.

Empero, los tres teóricos mencionados han hallado una combinación de ruedas dentadas, ejes y levas, con las que plasmar materialmente cualquier caso concreto del problema de tri-satisfactibilidad. El caso concreto de que se trate será satisfactible si y solamente si es posible hacer girar un determinado eje.

Al mismo tiempo, por ser *NP*-completo, el problema de tri-satisfactibilidad tiene una carascterística especial: resolvámoslo rápidamente, y tendremos resuelto cualquier otro problema *NP*-completo. En teoría de computación, los especialistas admiten casi unánimemente que ello sería imposible con un ordenador digital. ¿Habrán descubierto los autores un artefacto analógico capaz de arrinconar a las máquinas digitales? Continúan buscando posibles fallos en el diseño de su máquina.

Si realmente la máquina funcionase como prevé su descripción abstracta, quedaría abierta la cuestión de si llegaría a funcionar al construirla con elementos materiales. Tal vez en el mundo material pueda haber algo que conspire contra ello. Tal vez sea ley fundamental de la naturaleza que la descripción o simulación de todos los sistemas físicos haya de ser igual de rápida con sistemas digitales que con cualesquiera otros. En realidad, la idea de que el universo es esencialmente digital en todos los respectos lleva algún tiempo entre nosotros. Ello comportaría que todo ordenador analógico que amenazase desbancar a sus rivales de tipo digital sufriría inmediatamente fallos de precisión o velocidad. La única posible ventaja residiría en un alto grado de paralelismo. El agua acaba siempre por alcanzar su nivel.

La respuesta a la idea de fundar una red de voluntarios que organizasen la "Guerra nuclear" fue de lo más alentadora. El director será Mark Clarkson, que reside en 8619 Wassall Street, Wichita, Kansas, 67210, Estados Unidos. Los lectores interesados en figurar en la lista postal de la red, o dispuestos a ofrecerse para tareas concretas, deben ponerse en comunicación con Clarkson. En un futuro artículo, cuando la planificación esté completa,



*5. Artilugios analógicos para exhibir la refracción (**a**), la media aritmética de varios números (**b**) y para resolver ecuaciones cúbicas (**c**)*

describiré las actividades de la red y los programas disponibles.

La posibilidad de un DOCTOR DOS, un programa sanitario grabado en el disco, y capaz de impedir que los ordenadores personales sufran infecciones víricas, parece más lejana de lo que imaginé. Norman Ramsey, de Ithaca, Nueva York, ha llegado a la conclusión de que el DOCTOR DOS podría efectuar diagnósticos, pero no emprender acciones terapéuticas. Ramsey ideó un programa fundado en un "segundo DOS vírico, que se inscribe a sí mismo sobre los disquetes, exactamente de igual modo que el DOS enfermo, si bien no causa enfermedades". Este virus benigno bloquea las infecciones reservando, con carácter preventivo, espacio de memoria. El programa, añade Ramsey, incluía también algunas divertidas campanillas y cascabeles. "Podía incluso mostrar un mensaje en el momento del arranque: 'No tema, DOCTOR DOS les protege' para indicar al usuario que su DOS está a salvo". Desdichadamente, Ramsey inventó después un virus lo basante sagaz para eludir los remedios previstos por su análogo.

La idea del doctor-cum-virus se le ocurrió también a Joe Dellinger, biofísico de la Universidad de Stanford. Bastante curiosamente, su intención no era crear un médico, sino un virus inocuo capaz de pasar de unos discos a otros sin ser percibido. Dellinger se inspiró en la analogía entre los programas y los seres vivos. Unos y otros pueden padecer parásitos. En particular, un sistema operativo de disco pudiera portar un virus cuyo prolongado éxito reproductivo se fundara, en parte, en su capacidad para no ser nunca detectado. Un rasgo clave del virus de Dellinger es que sólo infecta el DOS de discos "esclavos" de 48K; los discos "patrones" contienen siempre el DOS limpio. Además de "apenas ocupar espacio" en los discos infectados, este indetectable virus verifica la exactitud del DOS anfitrión cada vez que se copia en un disco nuevo. Su manifiesto interés en la duradera salud de su hospedador le induce a asegurarse de que la copia sea exacta. Dellinger informa haber compartido el programa de este virus benigno con algunos amigos. Dos de ellos, teme, son bastante descuidados, por lo que la cepa puede haberse diseminado allende California. ¿Cómo podemos saber si nuestro DOS tiene el virus de Dellinger? Según él, durante medio segundo puede producirse un ruido silbante, como el de un látigo, en el momento en que el virus se copia a sí mismo.

Los virus que la programación puede contraer tal vez no sean tan virulentos como pude hacer pensar en el artículo de "Juegos de ordenador" de mayo. Kenneth L. Kashmarek, de Eldridge, Iowa, señala que ningún virus podrá propagarse a discos provistos de un sistema operativo distinto del sistema del disco hospedador. Kashmarek protege sus discos contra escritura, medida de precaución y antisepsia capaz de detener la difusión de cualquier virus –a menos, claro está, que se haya eludido el soporte lógico (*software*) de protección contra escritura. Kashmarek se pregunta, igualmente, si es correcto analizar en los medios de comunicación los virus y otras enfermedades de los ordenadores. Por mi parte, no dudo de que poner en entredicho la reputación del *software* sea asunto serio. Soy de la opinión de que epidemias informáticas como las que he venido describiendo son cosa de un futuro cercano. En mi opinión, "prevenir es curar". Tengo la esperanza de que la discusión pública sirva de acicate a la investigación de antídotos.

Entretanto, ha quedado por fin revelada la fuente del rumor que dio arranque a la invención de la "Guerra nuclear". En julio de 1984 relaté la historia de la CIZAÑA y el SEGADOR. En mayo de 1985 di la descripción de ANIMAL, un programa de juego similar a los de la "Guerra nuclear" que sacaba copias de sí mismo en los ordenadores de todos los jugadores que utilizasen un mismo sistema de tiempo compartido. El autor de este programa, John Walker, de Sausalito, California, ha dado un paso al frente, y proclamado su responsabilidad en la versión de más éxito. En realidad, ANIMAL era solamente parte de la historia. En el seno del programa de juego había otra porción de *software*, llamada PENETRACIÓN, a cuyo cargo corría la reproducción del programa. Escrita en enero de 1975, PENETRACIÓN era una subrutina capaz, cuando era reclamada, de crear "un proceso independiente que, mientras el programa hospedador atendía a sus asuntos, inspeccionaba los directorios accesibles a la persona que la reclamaba. Si un directorio no contenía una copia del programa, o contenía una versión no actualizada, PENETRACIÓN se encargaba de introducir en dicho directorio una versión de la copia en proceso de ejecución. PENETRACIÓN era muy remirada, y tenía gran cuidado de no destruir, por ejemplo, programas de usuario sin relación con ella, aunque llevasen el mismo nombre".

Taller y laboratorio

De qué modo la reflexión solar en el agua ofrece un medio para calcular la pendiente de las olas

Jearl Walker

Cuando el sol se pone en alta mar su reflexión puede ser oval o columnar. ¿Qué la provoca? Lorne Whitehead, de TIR Systems, Vancouver, quien ha estudiado el asunto, me escribe que la imagen tiene que ver con la pendiente máxima de las olas. Así, fotografiando la reflexión es posible estimar la pendiente máxima sin necesidad de salir al mar.

Para seguir el trabajo de Whitehead empezaremos por examinar qué es lo que determina la altura y la anchura de la zona de reflexión observada. Supondremos que el sol es una fuente luminosa puntual. (En realidad, ocupa un arco de unos 0,5 grados en nuestro campo visual.) E imaginaremos que la superficie del agua es lisa.

Supongamos que la superficie del agua sea plana. Porque dista mucho el sol, sus rayos llegan al agua paralelos entre sí, se reflejan en ésta y una parte alcanza nuestra vista. En esa hipótesis, la reflexión del sol se percibirá cual si la superficie del agua fuese un espejo que yaciese horizontal ante nosotros.

La reflexión de cada rayo luminoso en la superficie acostumbra a expresarse en función de unos ángulos que se miden con respecto a la llamada normal, o recta perpendicular a la superficie en el punto de reflexión. El rayo incide bajo cierto ángulo que se mide con respecto a la normal. El rayo reflejado forma un ángulo igual. Esta regla es válida, aun cuando la superficie sea curva o ladeada. Doquiera que un rayo se refleje en la superficie, hay que construir mentalmente una perpendicular a la superficie en ese punto.

Cuando la superficie del agua está horizontal, sólo hay un punto de la misma que refleje rayos hacia nosotros. Un procedimiento para determinar dónde se encuentra ese punto dentro de nuestro campo visual es imaginar que observamos la escena sin la ventaja de la percepción de profundidad, o sea, como si mirásemos una foto.

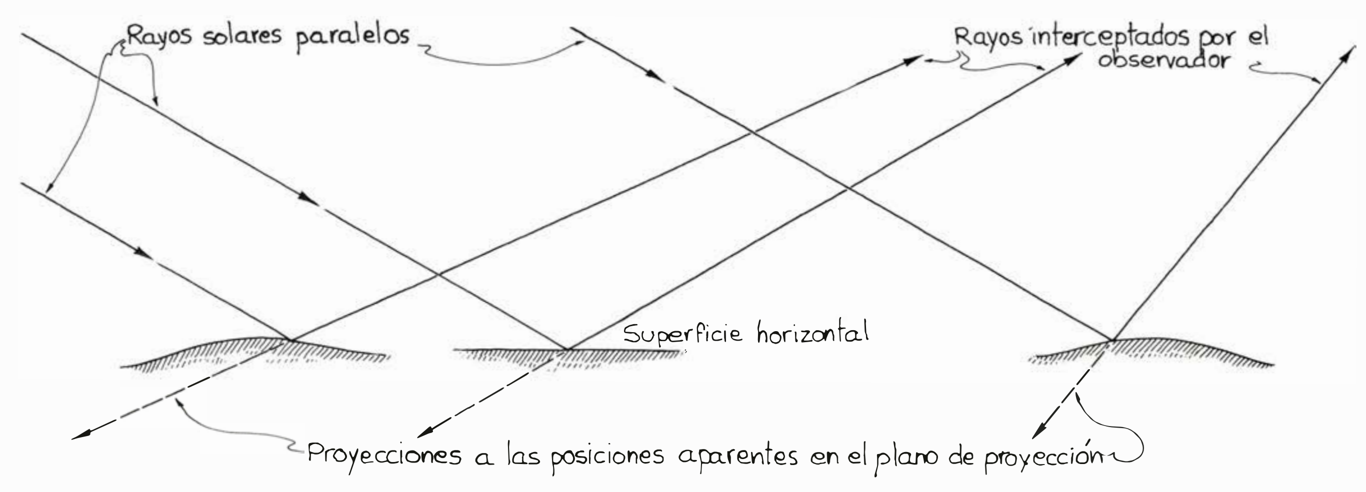
Esa representación plana se llama plano de proyección [*véase la figura 3*]. A ese plano la línea del horizonte lo cruza de un lado a otro. Entonces el punto que refleja hacia nosotros los rayos solares se halla, en el plano de proyección, por debajo del horizonte. Ahí es donde vemos la imagen del sol. Cuando la superficie del agua está horizontal, la imagen sobre el plano de proyección se halla muy por debajo del horizonte en tanto que el sol se mantenga por encima. Pero cuando éste se pone, la imagen se eleva hacia el horizonte. Y cuando se hunde en el horizonte, la imagen desaparece en el mismo.

Cuando la superficie del agua se curva con olas mansas, los lomos de éstas reflejan los rayos de acuerdo con la sencilla regla de los ángulos. En este caso, empero, en la superficie hay numerosos lugares que reflejan rayos, lugares que varían constantemente de posición, ya que las olas conforman una y otra vez la superficie del agua al tiempo que se mueven en todas las direcciones posibles. Así, en cualquier instante, veremos un gran número de imágenes del sol sobre el plano de proyección. Y la zona de reflexión asociada a un sol poniente será la composición de esa multiplicidad de imágenes.

Al objeto de determinar el modo en que las olas desparraman las imágenes del sol comencé por estudiar de qué manera se mueve una imagen sobre un plano de proyección cuando la superficie reflectora se ladea uniformemente en una dirección. Tras colocar un lápiz derecho sobre una mesa, inmovilizado con cinta adhesiva, tendí delante un espejo plano y rectangular y puse mis ojos junto al tablero de la mesa. Entonces, el borde opuesto del espejo, al pie del lápiz, hacía de horizonte.

Prescindí de toda sensación de profundidad y supuse el lápiz y su imagen situados en un plano de proyección. Para medir distancias en este plano me valí de una regla transparente, manteniéndola inmóvil, así como mi cabeza, a la vez que observaba con qué puntos de la regla coincidían las distintas partes del plano de proyección. Por ejemplo, en mi campo visual, la punta del lápiz se hallaba a tres centímetros por encima del borde opuesto del espejo y su imagen a tres centímetros por debajo, de conformidad con la regla para superficies horizontales.

Seguidamente levanté el borde próximo del espejo, manteniendo el opuesto apoyado en la mesa. El punto que reflejaba la punta del lápiz vino



1. Reflexiones de los rayos solares en el agua

hacia mí, a lo largo de la superficie del espejo. Pero en el plano de proyección la imagen se desplazó hacia abajo.

Ladeé luego el espejo hacia mí. Esta vez el punto donde se reflejaba la punta del lápiz se alejó por la superficie. Pero en el plano de proyección la imagen se elevó.

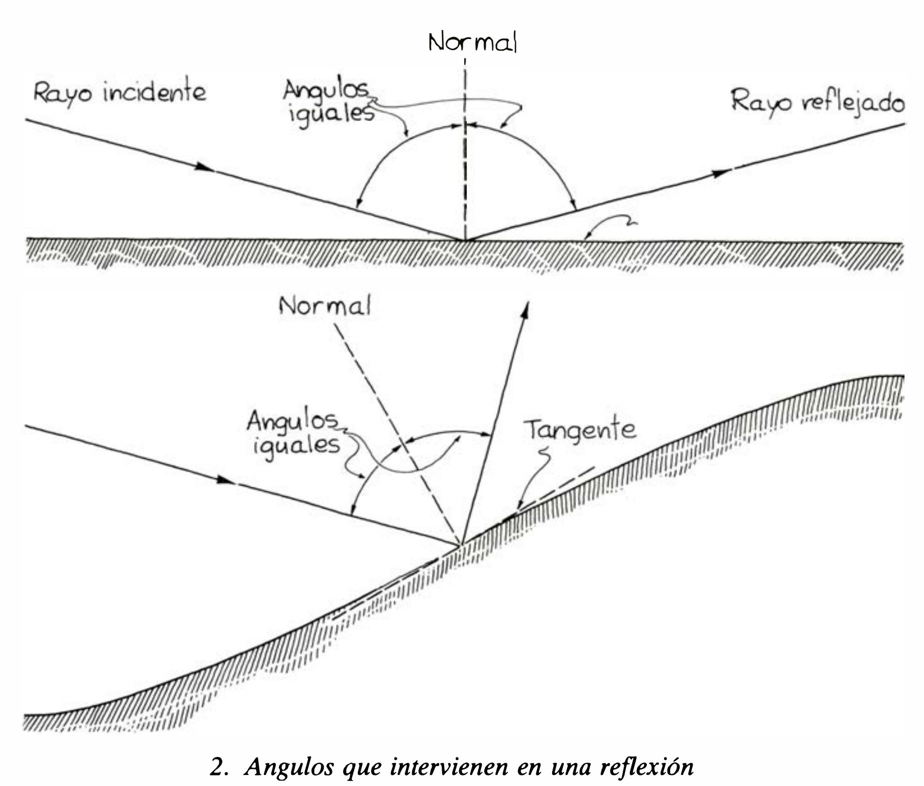
Este montaje no retrata fielmente la reflexión de los rayos solares en una superficie plana, puesto que los rayos que llegan al espejo no son paralelos. No obstante, el desplazamiento de la imagen sobre el plano de proyección es similar en líneas generales. Es decir, cuando la superficie del agua se inclina del lado contrario al observador, la imagen del sol desciende en el plano de proyección, y cuando se inclina del lado del observador, la imagen se eleva. La longitud del desplazamiento la determina la pendiente de la superficie.

Podemos definir la pendiente como la tangente del ángulo que la superficie se inclina. Por ejemplo, si la superficie se inclina 16,7 grados con respecto a la horizontal, la pendiente es de 0,3 (número adimensional). En un punto de una superficie curva la pendiente es la que presenta la recta tangente a la superficie en ese punto.

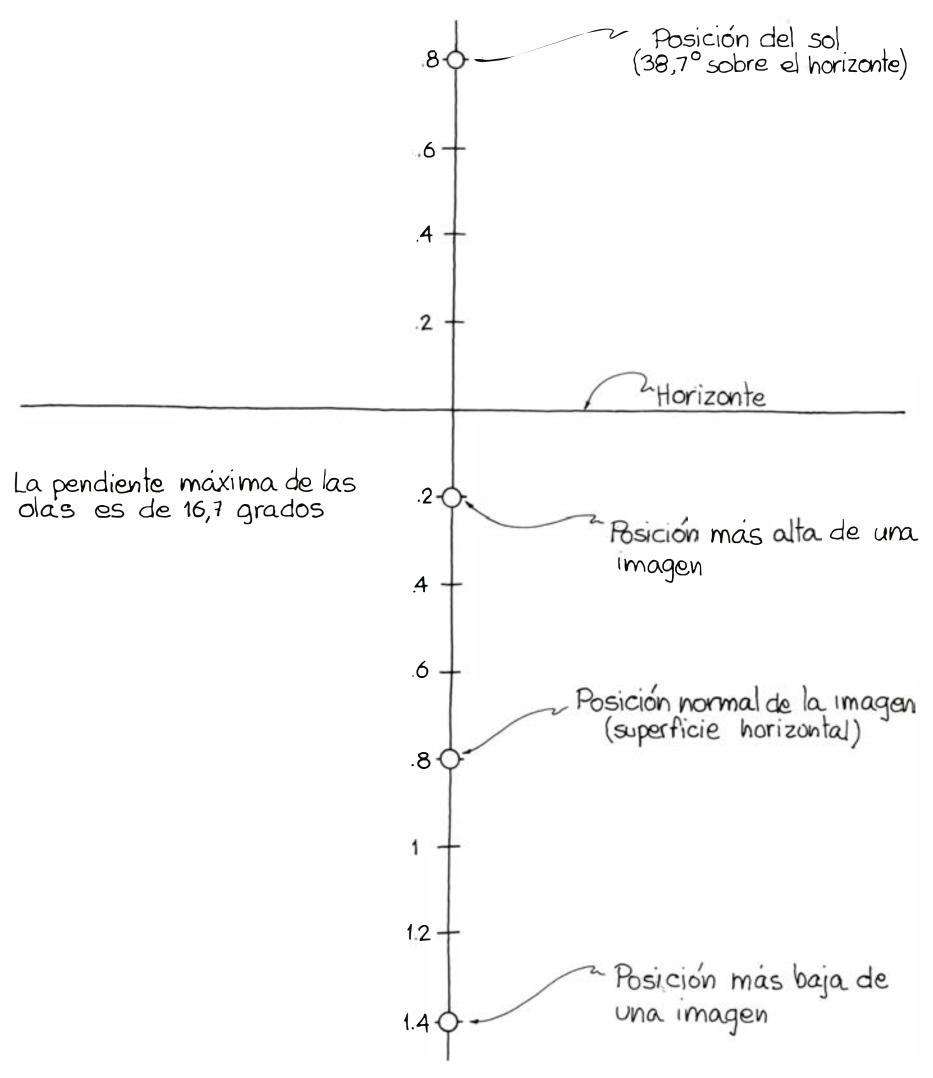
En el plano de proyección podemos emplear un eje vertical graduado en pendientes. Por ejemplo, supongamos que el sol se halle a 38,7 grados por encima del horizonte en nuestro campo visual. En el plano de proyección, el horizonte estará a una altura nula y el sol en una posición que será la tangente de 38,7 grados, o sea, a 0,8 por encima. Si la superficie del agua está horizontal, la imagen del sol estará a 0,8 por debajo del horizonte del plano de proyección.

Imaginemos que la superficie del agua esté inicialmente horizontal y que, a continuación, se incline uniformemente del lado opuesto a nosotros hasta adquirir una pendiente final de 0,3. La imagen del sol descenderá en el plano de proyección el doble de la pendiente final de la superficie, es decir, 0,6. Si, por contra, la superficie se inclina de nuestro lado hasta una pendiente de 0,3, la imagen del sol ascenderá en el plano de proyección el doble de la pendiente de la superficie, es decir, 0,6.

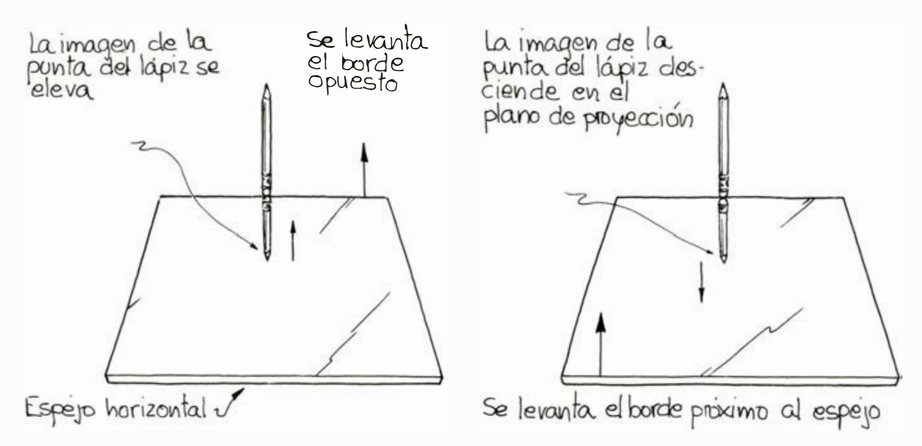
Rara vez una superficie acuática natural se inclina uniformemente; a causa de las olas acostumbra a presentar toda una gama de pendientes. Whitehead pretendía mostrar que la máxima pendiente de las olas determina las dimensiones de la zona de reflexión solar en el agua. Para seguir su razonamiento empecemos suponiendo que la superfi-



2. Angulos que intervienen en una reflexión



3. Alcance vertical de la zona luminosa



4. Experiencias con reflexiones en un espejo inclinado

cie esté horizontal y que el sol y su imagen queden a 0,8 por encima y por debajo del horizonte del plano de proyección. Examinemos luego de qué manera alteran las olas las reflexiones en el lugar que crea la reflexión normal del sol. Unas veces, la superficie del agua en ese punto estará horizontal y veremos la imagen. Otras, las olas la inclinarán y eliminarán la imagen. Así pues, la imagen aparece y desaparece conforme las olas pasan por el lugar correspondiente del agua.

A continuación imaginemos un punto de la superficie del agua levemente más alto en el plano de proyección. Si la superficie estuviera constantemente horizontal, nunca veríamos la imagen del sol, pero como hay olas que pasan por él, éste a veces se inclinará hacia nosotros lo suficiente para hacernos ver una reflexión del sol. Y también la imagen aparecerá y desaparecerá con el paso de las olas por ese lugar.

Pensemos ahora en un lugar del agua cuya imagen sobre el plano de proyección esté más abajo que la imagen normal. Habrá ocasiones en que la superficie del agua se incline lo suficiente para que veamos allí la imagen del sol.

¿Hasta qué distancia por encima y por debajo de la posición normal pueden verse imágenes del sol? Estos límites los establece la pendiente máxima de las ondas de mayor tamaño. Supongamos que las olas tengan una pendiente máxima de 0,3 (16,7 grados). La posición más alta posible que pueda ocupar una imagen en el plano de proyección estará por encima de la posición normal una distancia doble que la máxima pendiente de las olas, es decir, una distancia de 0,6. O sea, como en nuestro ejemplo la posición normal se encuentra a 0,8 por debajo del horizonte del plano de proyección, la posición de la imagen estará a 0,2 por debajo de dicho horizonte.

Análogamente, la posición más baja posible que ocupe una imagen en el plano de proyección estará por debajo de la posición normal una distancia doble que la máxima pendiente de las olas, situándola en la posición 1,4 del eje vertical del plano de proyección. En este caso, pues, podremos ver imágenes del sol entre las posiciones 0,2 y 1,4 del eje vertical. Estas imágenes no serán constantes, ya que las pendientes varían ininterrumpidamente en la superficie del agua. Ahora bien, como el sistema visual saca una media temporal de la luminosidad, se percibe una iluminación bastante constante.

A medida que el sol baja, la zona de reflexión se mueve hacia el horizonte. En términos del plano de proyección, esa zona asciende. En nuestro ejemplo, el extremo lejano de la zona de reflexión alcanza el horizonte cuando el sol posee una pendiente de 0,6 en nuestro campo visual, la cual equivale a unos 31 grados. Finalmente, la zona desaparece en el horizonte.

El alcance vertical de la zona de reflexión sobre el plano de proyección depende de la pendiente máxima de las olas. Si aumenta esa pendiente máxima, el alcance vertical aumenta el doble sobre el plano de proyección. Tal relación permite medir la pendiente máxima de las olas. Para ello hay que fotografiar la zona de reflexión antes de que llegue al horizonte. Además, se mide el ángulo entre el horizonte y el sol. Sobre la foto se coloca, seguidamente, una hoja de plástico transparente donde se marca y gradúa el plano de proyección. En él se traza el horizonte y el sol se señala como un punto.

Se calcula la tangente del ángulo del sol con respecto al horizonte. Supongamos que éste fuese de 38,7 grados (con una tangente de 0,8) al tomar la foto. Este dato se emplea para marcar la escala del eje vertical del plano de proyección. Sobre la foto se señala la posición del sol a 0,8 por encima del horizonte y con una regla se mide, en centímetros, la distancia entre ambos. Supongamos que esa distancia resulte de cuatro centímetros. Con ello a cada centímetro de la regla corresponderá una distancia de 0,2 sobre el eje vertical del plano de proyección. Ese eje se gradúa según esa relación.

Seguidamente se determina el alcance de la zona de reflexión a lo largo del eje. Supongamos que se extienda desde 0,5 a 1,1. Como el sol está a 0,8 por encima del horizonte, la posición normal de la imagen del sol debe estar a 0,8 por debajo del horizonte. Por tanto, el punto más bajo de la zona de reflexión deberá caer a 0,3 por debajo de la posición normal. Entonces, como la distancia, a lo largo del eje, desde la posición normal hasta el punto más bajo de la zona es el doble que la pendiente máxima de las olas, ésta debe ser de 0,15, que corresponde a 8,5 grados.

Whitehead ha explicado también la anchura de la zona de reflexión en el plano de proyección. Para seguir sus explicaciones retorné a mi lápiz y a mi espejo. Esta vez situé el margen derecho del espejo sobre la línea que corría entre mí mismo y el pie del lápiz, hallándose éste en contacto con la esquina derecha opuesta del espejo. Al ladear el espejo hacia la derecha, la imagen del lápiz en el plano de proyección rotó en torno al pie del mismo un ángulo doble que la inclinación del espejo. Cuando ésta era de 45 grados, la imagen giraba 90 grados y aparecía horizontal en el plano de proyección.

La imagen de la punta del lápiz en el plano de proyección puede hallarse superponiendo una recta que recorra el plano desde la imagen hasta la punta del lápiz. Esa recta estará inclinada con respecto al eje vertical lo mismo que el espejo. Superpuesto al plano de proyección, está el borde contrario del espejo. Sobre el plano, la imagen distará del borde del espejo lo mismo que la punta del lápiz real.

Para determinar la anchura de la zona de reflexión sobre la superficie del agua Whitehead emplea una construcción similar en un plano de proyección [*véase la figura 6*]. Supongamos que las olas tengan una pendiente máxima de 0,3 (16,7 grados). En el plano de proyección se traza, pasando por la posición del sol, una recta inclinada a la derecha 16,7 grados con respecto a la vertical. Esa recta se prolonga hacia la parte inferior izquierda del plano de proyección.

Luego se traza una segunda recta, perpendicular a la anterior y que pase por el punto del horizonte situado exactamente debajo del sol. Esta recta corresponde al borde opuesto del espejo. A lo largo de la primera se mide la distancia entre el sol y la intersección de ambas rectas. A partir de la intersección y a lo largo de la primera recta, se lleva una distancia igual, cuyo sentido apunte hacia la parte inferior izquierda del plano de proyección. El punto así alcanzado será la posición de la imagen del sol en un espejo inclinado 16,7 grados hacia la derecha.

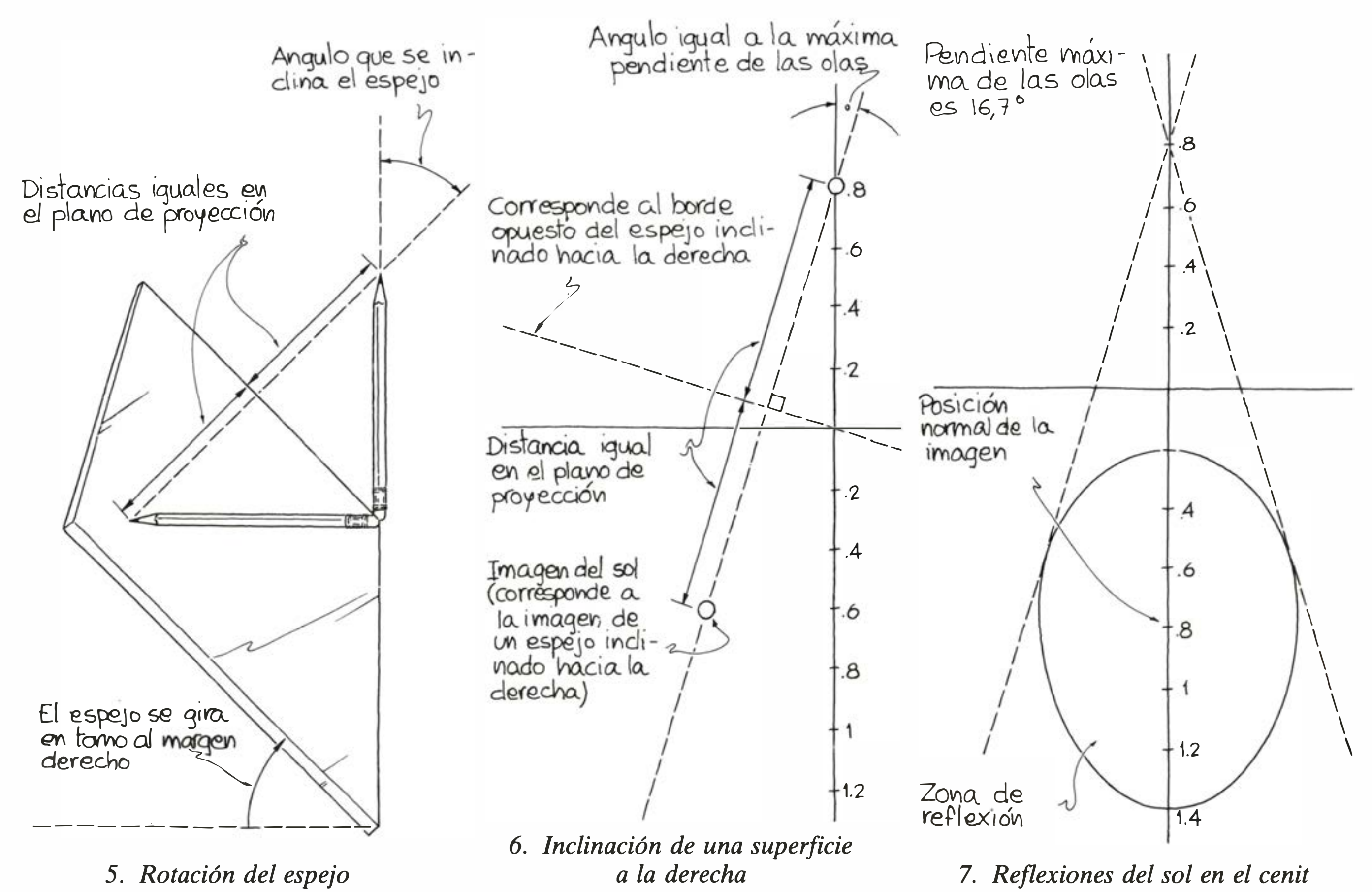
Estas operaciones se repiten para la parte derecha del sol. De este modo tendremos dos rectas que divergen hacia el borde inferior del plano de proyección. La zona de reflexión se encontrará entre esas dos rectas y coincidirá con ellas en los puntos correspondientes a los espejos ladeados hacia la derecha y hacia la izquierda. El ángulo formado por las rectas será el doble que la pendiente máxima de las olas.

Añadiendo al plano de proyección los puntos más alto y más bajo de la zona de reflexión, determinados según se expuso antes, es posible esbozar la zona completa trazando una curva suave y continua que enlace los puntos extremos [*véase la figura 7*]. Si la pendiente máxima de las olas aumenta, el ángulo entre las rectas divergentes se hace mayor y la zona de reflexión crece tanto en anchura como en altura en el plano de proyección. Cuando el sol está alto, la zona es oval, de menor anchura que altura. A medida que el sol cae, la zona se desliza hacia el horizonte, estrechándose porque la limitan las rectas divergentes. El óvalo puede así parecer una columna larga que se prolongue hacia el horizonte. Dado que Whitehead y el autor han tratado el sol como una fuente luminosa puntual, el extremo superior de tal columna debe ser un punto. Ahora bien, puesto que el sol ocupa en realidad unos 0,5 grados de nuestro campo visual, la finura del extremo superior de la columna no podrá ser inferior a esa cifra.

Cuando se recuerda que las reflexiones proceden de ondas que se mueven en todas direcciones, puede sorprendernos que la columna tenga una anchura y una altura desiguales. Llama asimismo la atención que la columna se nos antoje alargada. Lo cierto es que ocupa sólo un pequeño ángulo en el plano de proyección. Parte de su aparente longitud débese a la percepción en profundidad de la escena: la columna parece como si se extendiera una gran distancia horizonte adelante. Parcialmente esa ilusión se debe también a una interpretación errónea de los ángulos cercanos al horizonte: el sol bajo y el extremo superior de la columna parecen grandes porque el horizonte aparenta estar distante. (Este mismo fenómeno explica el ensanchamiento aparente de la luna cuando se halla cerca del horizonte.)

Puede resultar entretenido estudiar las zonas de reflexión producidas por el sol o por la luna bajo otras circunstancias. En ocasiones acaso puedan detectarse en el agua corrientes superficiales si la pendiente máxima de las olas de una corriente difiere de la pendiente de las olas del agua circundante. En ese caso, ¿se hace asimétrica o se desfigura la zona de reflexión? ¿Qué le sucede cuando las olas se mueven uniformemente en una dirección? ¿De qué modo afectan a los cálculos de Whitehead, acerca de la forma de la zona de reflexión, la distribución estadística de las pendientes de las olas? ¿Qué ocurre con la forma de la región y la distribución de la luz cuando las olas adquieren cierto tamaño y dejan de ser senoidales?

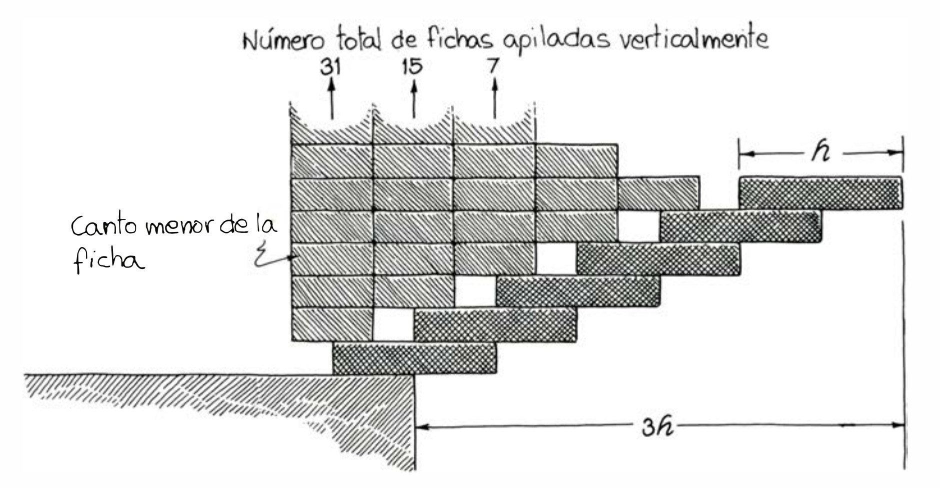
En octubre pasado les describí algunas combinaciones para apilar fichas de dominó. Una de ellas consistía en colocar una serie de fichas una encima de otra, de suerte tal que sobresalieran del borde de una mesa. Cada



5. Rotación del espejo

6. Inclinación de una superficie a la derecha

7. Reflexiones del sol en el cenit



8. Un procedimiento para equilibrar

ficha debía tener uno de sus frentes hacia abajo, con su longitud perpendicular al borde de la mesa. La intención era averiguar el máximo voladizo para un número de fichas dado.

Varios lectores (Eugene Wall, de Aspen Systems Corporation, Rockville; R. F. Tindall, de Cambridge; David Callway, de Fort Collins, y Wayne Fullerton, de Houston) apuntan que la serie matemática que les ofrecí entonces para describir el voladizo puede escribirse en función de la constante de Euler (0,57722).

La distancia horizontal entre el canto de la mesa y el borde externo de la n-ésima ficha es la semilongitud de una ficha multiplicada por la suma de la constante de Euler más la función digamma para $n + 1$. (La función digamma es la derivada logarítmica de la función gamma corriente.) Cuando n es grande, la función digamma es aproximadamente igual al logaritmo natural de $n + 1$ menos $1/(2n + 2)$.

Cuando, para calcular el número de fichas necesarias para producir un voladizo de 50 longitudes de ficha, se emplean las fórmulas deducidas de la mencionada, se encuentra que hacen falta $1{,}5 \times 10^{43}$ fichas, y no $1{,}5 \times 10^{44}$ tal como les dije.

¿Hay algún medio de apilar fichas de dominó para construir un gran voladizo de una manera menos costosa? Tindall y Hans-Hellmuth Cuno, de Waldetzenberg, sugieren la posibilidad de conseguir, por contrapesado, un voladizo dado con menos fichas. En su sistema, cada nueva ficha se coloca de modo que su centro esté encima del borde externo de la colocada inmediatamente debajo. Con ello esta última se tornaría inestable, pero se equilibra poniéndole una ficha de contrapeso en su extremo interno [*véase la figura 8*].

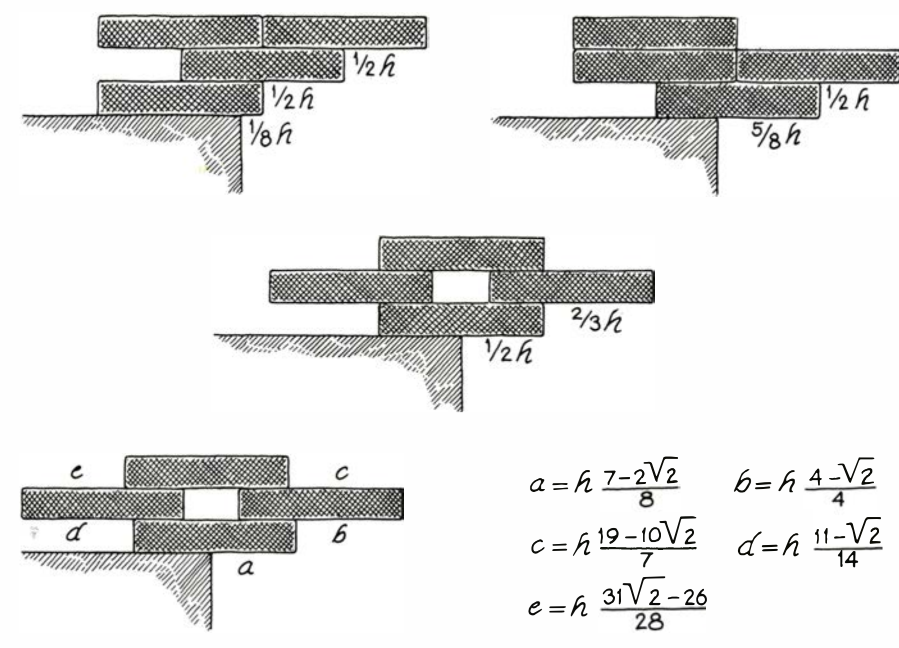
Por ejemplo, para conseguir un voladizo de tres longitudes, se escalonan seis fichas a partir del canto de la mesa, cada una de ellas con su centro encima del borde externo de la ficha (o de la mesa) situada inmediatamente debajo. Como contrapeso se apilan 31 fichas encima del borde interno de la ficha en contacto con la mesa, 15 sobre la segunda, siete sobre la tercera, tres sobre la cuarta y una sobre la quinta. La sexta y más externa no requiere contrapeso. Contándolas todas, se necesitan 63 fichas para esta construcción, venciendo claramente a las 227 que requiere mi sistema.

E. James Morton, de la John Hancock Mutual Life Insurance Company, Boston, indica que Stephen Ainley ha publicado algunos ingeniosos sistemas para apilar cuatro objetos rectangulares del tipo de fichas de dominó (*The Mathematical Gazette*, vol. 63, n.º 426, pág. 272; diciembre, 1979). La dimensión longitudinal de cada ficha debe ser perpendicular al canto de la mesa. Si se apilan como les describí en octubre pasado, el máximo voladizo es de 1 1/24 veces su longitud. Las dos primeras combinaciones de Ainsley, que se representan en la figura 9, producen un voladizo de 1 1/8 longitudes. (Las fracciones se refieren a la longitud de la ficha.) De contrapeso sirven una o dos fichas.

En una tercera combinación se logra el contrapesado con una ficha colocada encima del borde interno de la ficha inferior y otra que se coloca encima de la pila. Esta última ficha se pone encima mismo de la que está en el fondo. La combinación da un voladizo de 1 1/6 longitudes.

Pero la combinación representada en la parte inferior de la figura se lleva el gato al agua. Adviértase que la ficha de arriba no está exactamente encima de la ficha del fondo. Esta construcción da un voladizo de 1,1979 longitudes, ganando, pues, por un escaso margen a la anterior.

A los lectores interesados en estos pasatiempos puede divertirles una nota publicada por R. E. Straton (*The Mathematical Gazette*, vol. 64, n.º 429, págs. 202 y 203; octubre, 1980). Allá se muestra cómo construir un apilamiento, con un voladizo de casi veinticuatro centímetros, con 28 fichas de dimensiones 6 × 3 × 1,5 centímetros. Si el apilamiento se rota de modo que las diagonales de las fichas queden perpendiculares al canto de la mesa, el voladizo alcanza casi los 26,7 centímetros.



9. Combinaciones de Stephen Ainley para apilar cuatro fichas de dominó

Libros

Cajal, complejidad y ciencia, teoría de números y Keynes

A. Albarracín, R. Margalef, M. de Guzmán y A. Argandoña

RAMÓN Y CAJAL'S CONTRIBUTION TO NEUROSCIENCES. Editores S. Grisolía, C. Guerri, F. Samson, S. Norton y F. Reinoso-Suárez. Elsevier; Amsterdam, 1983. El año 1883, tras varias peripecias universitarias, Santiago Ramón y Cajal obtenía la cátedra de anatomía descriptiva y general de la Facultad de Medicina de la Universidad de Valencia. Recién instalado allí, y al margen de su dedicación primordial al cultivo de la anatomía microscópica en general, un afán romántico e idealista, que es fruto tanto de una aptitud innata como de su autoformación filosófica en el idealismo germano, va pronto a conducirle a la investigación de la esencia y del mecanismo del pensamiento humano.

Hijo de su tiempo, nuestro histólogo no puede sustraerse a la problemática que supone el tránsito desde esa mentalidad idealista, que le impele a la aventura pesquisitiva, a la mentalidad positiva que unos años antes, en torno a 1875, se ha iniciado en España. Es un tránsito difícil, pleno de polémicas y de actitudes hostiles, en el que la influencia del krausismo positivo representará un papel decisivo, ofreciendo una fórmula conciliadora entre la razón y la experiencia. Ramón y Cajal, desde Valencia, se incorpora a la corriente innovadora, creando un Comité de Investigaciones Psicológicas, en el que, siguiendo la corriente "medicalizadora" del XIX señalada por Foucault, lo *patológico* primará sobre lo *normal*. Su objetivo va a ser –así lo confesará en sus *Recuerdos de mi vida*– descubrir las "sorprendentes y harto descuidadas actividades, o si se quiere anomalías del dinamismo cerebral". Por el Centro, instalado en su propio domicilio, van a desfilar "especies notabilísimas de histéricas, neurasténicos, maníacos y hasta de acreditados *mediums* espiritistas".

El objetivo perseguido por nuestro autor es la investigación de la esencia y mecanismo del pensamiento humano, ya lo dije. Quiere acceder a ella a través de la consideración de los estados patológicos y de las posibilidades terapéuticas que su formación médica le ofrece. Pero pronto concluirá esta primera fase de su labor. La psicología experimental le lleva al desaliento; un doble sentimiento de estupor y desilusión se apodera de él: "Estupor, al reconocer la realidad de fenómenos de automatismos cerebrales, estimados hasta entonces como farsas y trampantojos de magnetizadores de circo; y decepción dolorosa al considerar que el tan decantado cerebro humano, la 'obra maestra de la creación', adolece del enorme defecto de la sugestibilidad".

Agotada así la posibilidad primera de entender el misterio del alma y del pensamiento, pronto inicia Ramón y Cajal la segunda etapa de su obra científica. Puesto que la clínica no le ha ofrecido la posibilidad de adaptarse al positivismo crítico, lo más cuerdo ahora será renunciar a las investigaciones sobre la esencia y las causas primeras de los hechos, limitándose al estudio de los fenómenos y al descubrimiento de las leyes que les rigen, hasta llegar, si ello es posible, a una ley general que las abarque a todas, "que sería el *desideratum* de la ciencia". Desde ahora, su labor va a consistir en la recolección de hallazgos objetivos, convirtiéndose así en un "fanático irreductible de la religión de los hechos".

He aquí sus propias palabras. "El problema nos atraía irresistiblemente. Adivinábamos el supremo interés que para una psicología racional tenía el formar un concepto claro de la organización del cerebro. Conocer el cerebro –nos decíamos en nuestros entusiasmos idealistas– equivale a averiguar el cauce material del pensamiento y de la voluntad, sorprender la historia íntima de la vida en su perpetuo duelo con las energías exteriores, historia resumida, y en cierto modo esculpida, en esas coordinaciones neuronales defensivas del reflejo, del instinto y de la asociación de ideas. Mas por desgracia, faltábanos el arma poderosa con que descuajar la selva impenetrable de la sustancia gris, de esa *constelación de incógnitas*, como en su lenguaje brillante la llamaba Letamendi".

Ramón y Cajal busca una "base objetiva suficiente". De ahí el cambio que en su tarea se produce, abandonando la aproximación clínica –dinámica, subjetiva– a favor de la visión estructural –estática, objetiva– en su investigación acerca de la sede de los fenómenos psíquicos. Y ese arma poderosa que se precisa para "descuajar la selva impenetrable de la sustancia gris", va a proporcionársela, por azar, el conocimiento, a través de Luis Simarro, del método de tinción de Golgi.

Los hallazgos por esta vía constituyen ya la magna obra del futuro premio Nobel, jalonada por sus sucesivos descubrimientos de la fina estructura de todo el sistema nervioso. Es evidente que tal obra, fundamental para la neurohistología e iniciada en 1883, no alcanzó su objetivo final: el descubrimiento de la sede del pensamiento y de las funciones psicológicas del cerebro humano.

El año 1982, la propia ciudad de Valencia tuvo la feliz iniciativa de convocar un *Simposium*, conmemorativo del centenario de la llegada de Ramón y Cajal a la universidad valentina, bajo el título de "Horizons in Neuroscience". Lo patrocinaba el Instituto de Investigaciones Citológicas de la Caja de Ahorros de Valencia y las Universidades de Kansas, Valencia y Autónoma de Madrid. Medio centenar de investigadores de ambos lados del Atlántico presentaron allí sus contribuciones, recogidas meses más tarde en un libro pulcramente editado con el título de *Ramón y Cajal's Contribution to the Neurosciences*.

Un historiador de la medicina no puede entrar en el contenido detallado de las aportaciones concretas que a este *Simposium* y en este libro se nos ofrecen. A lo sumo, debe limitar su tarea a desvelar el sentido del hecho. Y ya en su misma introducción, los editores nos lo descubren. "¿Cómo posibilitan los procesos físicos, químicos y celulares del sistema nervioso la expresión del lenguaje y los fenómenos que un tanto imprecisamente denominados instinto, aprendizaje, memoria e inteligencia? La cuestión de cómo trabaja el cerebro constituye el núcleo mismo de la existencia humana. Esta reunión ilustra en parte en cuán sofisticada instrumentación y nueva biología nos hallamos inmersos y, sin embargo, qué pequeña distancia hemos avanzado

conceptualmente desde Cajal". Ahora, como ayer, un mismo objetivo.

A través de una serie de capítulos que engloban las comunicaciones presentadas al *Simposium* –fundamentos históricos, biología molecular y celular, anatomía evolutiva y comparada, substrato estructural y función nerviosa–, los distintos autores nos ofrecen sus aportaciones, muy rigurosa y sugestivamente resumidas en un capítulo final de síntesis, redactado por S. Norton y F. Samson. ¿Y cuál es la conclusión?: "El contenido de los capítulos augura un favorable progreso a la neurociencia, no sólo en lo que atañe a la resolución de los problemas específicos de la función cerebral, sino también ofreciendo importantes pasos hacia la comprensión de la esencia de la función cerebral". Cien años después, la bandera de Ramón y Cajal sigue en pie. Por ello pueden escribir los autores de este capítulo final que, "si Cajal viviese hoy, se complacería sumamente, sin duda, contemplando el desarrollo de la fina estructura del axoplasma, o la bioquímica de las sinapsis: pero sobre todo su excitación y su asombro serían máximos ante la revelación de las funciones dinámicas de sus neuronas a nivel molecular y celular, así como ante la lista creciente de substancias neuroactivas halladas en el cerebro". Santiago Ramón y Cajal, que dejó prácticamente conclusa la exploración morfológica del sistema nervioso, no alcanzó a contemplar el desarrollo de la investigación fisiológica y bioquímica, por él sólo intuida. Es cierto que este *Simposium* le habría llenado de satisfacción. Pero no lo es menos, y creo que el sentido último de la reunión es éste, que se consideraría aún un tanto defraudado ante la permanente incógnita del misterio del pensamiento, que cien años de avances y de tecnificación no han logrado descubrir. Norton y Samson lo apuntan finamente en sus conclusiones finales: ¿no será preciso un camino totalmente nuevo, una cisura radical en la consideración del sistema nervioso, que nos permita englobar la teoría neuronal de Cajal en una red conceptual que sirva de puente de unión, cubriendo la actual sima entre las neuronas y los mecanismos superiores de la función cerebral?

Los hallazgos de Cajal –médula, bulbo raquídeo, protuberancia, cerebelo, mesencéfalo, tálamo óptico, cuerpo estriado, corteza cerebral–, por un lado. La sofisticada técnica micrográfica actual, los avances de la neuroquímica, de otra parte. El enlace desvelador, todavía desconocido. Por eso, tras la lectura de este libro que comento, no puedo dejar de recordar el afán de don Santiago: desbrozar la enigmática célula del pensamiento, perseguir las misteriosas *mariposas del alma*, cuyo batir de alas "quién sabe si esclarecerá algún día el secreto de la vida mental", descubrir el enigma del cerebro, "obra maestra de la vida".

En 1883, como en 1983, la clave que nos abra el misterio del alma sigue celosamente ocultada. Y entonces, como ahora, la esperanza guía la investigación de los cultivadores de la neurociencia. (A. A. T.):

IDEAS SOBRE LA COMPLEJIDAD DEL MUNDO, por Jorge Wagensberg. Tusquets Editores; Barcelona, 1985. Serie Metatemas, 9, 154 págs. Desde hace unos años, el doctor Jorge Wagensberg, profesor de la Facultad de Física de la Universidad de Barcelona, se ha convertido en un campeón de la visión integradora que ofrece una ciencia renovada, basada en muy pocas leyes que, a primera vista, parecen poner límites a la constructividad del universo, pero, en una segunda consideración, pueden ayudarnos a entender su infinita riqueza. En un número reciente de *Investigación y Ciencia* (julio de 1984, pág. 42) me referí a un simposio que acababa de celebrarse con palabras que podrían servir para anunciar el interés y la pertinencia del libro de Wagensberg. Somos conscientes de la dualidad entre cualquier proceso descriptible racionalmente en términos relativamente sencillos y la complicación de cualquier situación final a la que puede conducir, entre cuyos repliegues sospechamos se ha introducido algo imprevisto. Wagensberg nos cuenta esto y muchas otras cosas, en un libro breve y de contenido riquísimo, muy inteligente y muy bien escrito, que se lee con gusto de un tirón.

En el primer capítulo (10 páginas) –¿Sabemos siquiera lo que deseamos saber?– contrasta la tendencia de la ciencia a simplificar, a proporcionar descripciones lo más generales posibles, con la variedad de aspectos y riqueza de detalle que ofrece el mundo y que, también, requieren cierta explicación. Hay que conseguir que el ir y venir entre las complementarias solicitaciones no sea un círculo vicioso, sino "virtuoso" en el sentido de proporcionar una cierta elevación. "Nadie espera desvelar los secretos del estado de angustia o del sentido del humor partiendo animosamente del concepto de átomo de hidrógeno, pero nadie renuncia a que la ciencia se ocupe del orden universal de los sistemas y de los fenómenos." Este tipo de cuestiones inspiran el programa del libro, que parte de que "el centro del mundo está allí donde el mundo es pensado".

El segundo capítulo (30 págs.) se titula "La esencia del cambio" e introduce la discusión del azar; disputa allí si es "un producto de nuestra ignorancia o un derecho intrínseco de la naturaleza". El paso de la visión determinista del demonio de Laplace a la concepción de Schrödinger, según la cual los organismos se alimentarían de entropía negativa, parece señalar un lugar preferente a la consideración de los sistemas vivos, donde hay una "profusión de lo pequeño" y situaciones próximas al equilibrio, pero no coincidentes con el equilibrio, donde los cambios requieren poca energía o las diversas variantes son indiferentes. Parece que el autor desearía una visión más constructiva que la de Monod, en la que el mundo humano es una ilusión que choca con un universo sordo e indiferente. En los sistemas vivos la complejidad es esencial, y a la incertidumbre del entorno se asocian siempre las tentativas hacia el desarrollo de una capacidad de anticipación del sistema. Aquí estaría la base de la adaptabilidad de la vida, en términos de información y en el sentido de Michael Conrad.

El capítulo tercero (20 páginas), titulado: "El azar de la ignorancia y el azar absoluto (Sobre la aprehensión del caos)", centra su discusión sobre un tema más filosófico: hasta qué punto se puede creer en un indeterminismo esencial de la naturaleza. Pocas razones, por cierto, hay a su favor, pero siempre podemos creer que va a ocurrir algo para lo que no estamos preparados, introduciéndose así prácticamente el indeterminismo en nuestras vidas. Esta posición coincide sustancialmente con la de Popper, en "El universo abierto", según la cual siempre puede ocurrir lo inesperado, posición que, por otra parte, se encuentra en formas diversas en filosofías más antiguas. Desde un punto de vista operativo, la noción de azar se asocia con la imposibilidad de producir una descripción abreviada y correcta o total. "Una serie de dígitos es aleatoria si el menor algoritmo capaz de generarla contiene (aproximadamente) los mismos *bits* de información que la propia serie." (Lo cual conduce a preguntarse: "¿El mundo es abreviable o es tal como es dado?") Todo esto lleva a mencionar el teorema de Gödel, acerca de la aparente imposibilidd de formular un sistema coherente y cerrado, y a comentar que ahora se trata de institucionalizar el azar, llamándolo bifurcación, y postulando que las desviaciones pueden ser amplificadas por el sistema y aún verlo

como algo creador. Los comentarios sobre la ley de los grandes números son pertinentes para los biólogos: si resulta que la variancia no consigue estabilizarse, ciertas aproximaciones habituales de la estadística a determinados problemas biológicos tienen una base dudosa. El concepto de variable macroscópica se desvaloriza. La creencia de que el mundo es comprensible es probablemente necesaria para un organismo que continuamente ha de operar y tomar decisiones. Todo esto conduce a distinguir entre el azar epistemológico (con minúscula), nombre que damos a nuestra ignorancia, y el azar ontológico (el Azar con mayúscula), "una entidad metafísica que representa la contingencia pura que actúa ciegamente en el universo". Según el autor, la idea de Azar ontológico es tan sublime como vacía; algo así como el concepto kantiano de la "cosa en sí", y si bien no hay respuesta a las preguntas sobre el determinismo del mundo, pueden adoptarse actitudes en relación con dicha cuestión.

El capítulo 4 (18 páginas) lleva por título "El indeterminismo es la actitud científica compatible con el progreso del conocimiento del mundo (O el determinismo es la actitud científica compatible con la descripción del mundo)" y en él desarrolla la concepción de Popper en el sentido de que el universo aparece abierto por las limitaciones del sujeto (lo que puede formularse también en los términos de que un subsistema no puede reflejar sin residuo todo el sistema más amplio del que forma parte). Sin embargo, casi todos los que practican la ciencia creen en la inteligibilidad de la complicación del mundo, y, todo lo más, ven en la complejidad los recovecos donde parece refugiarse la indeterminación que pueda haber. Tiene que haber otras vías de acceso para aproximarse a ella.

El capítulo 5 es muy breve (6 págs.) y trata de "La simulación de la complejidad". El ver, mirar, observar, experimentar y simular aparecen como etapas sucesivas en una aproximación a aprehender la naturaleza. La ciencia reposa en un acuerdo entre los científicos, y la extensión exosomática de los instrumentos de observación y medida no cambia sustancialmente el problema. El autor se extiende en consideraciones sobre la simulación que, "representa el máximo grado de iniciativa del pensador para percibir" y tendría una "novedad genuina como categoría de percepción". Esta es una nota optimista, dadas las facilidades que la técnica actual ofrece a la simulación.

"El arte es una forma de conocer la complejidad. (O el principio de comunicabilidad de complejidades ininteligibles)", reza el título del capítulo 6 (el más largo, de 36 páginas), indudablemente una de las secciones más atractivas de todo el libro. Plantea la proeza que representa el reconocimiento prácticamente instantáneo de una persona, un prodigio que probablemente no está alejado del "pattern matching" que parece servir a los animales para situarse y guiarse en situaciones muy complejas (las aves en sus migraciones, percepción de pequeñísimos movimientos que revelan estados de ánimo, etc.). Este tipo de comprensión rápida no debe estar muy alejada de la percepción artística. La transmisión no es verbal, o puede ser verbal, como en la poesía. Los detalles que representan la diferencia entre dos situaciones o percepciones diferentes son poco importantes en términos de energía o del grado de "indeterminación" en el proceso generador, pero ahí están los resultados, con toda su significación, basados en una complejidad que se hace inteligible y recuperable.

Una hipótesis fundamental en el arte sería la comunicabilidad de una complejidad ininteligible. Hay muchas opiniones respecto al arte, pero es evidente, según el autor, la sorpresa con que un sistema complejo se puede percibir con la calidad de idea pura, simple y "elegante". Aquilatar las relaciones entre comunicabilidad y contenido es difícil, pero apasionante, y las páginas que se dedican a su discusión son más valiosas por los pensamientos que ponen en marcha, por lo que sugieren, que por su contenido; un buen ejemplo de la propensión de las formas complejas a extenderse y a envolverse en sí mismas, y a complicarse más. No es menos maravilla la complejidad de nuestra mente, como creadora de lo que puede ser un mundo con atributos de "científico". El problema del artista que "se mira para verse mirar" es análogo al del científico que se contempla en contemplación del mundo físico, y trata de llevar su crítica a través de un número indefinido de recursiones en este ejercicio de contemplación, que pudiera conducir al solipsismo. En todo caso asistimos a la confrontación de la comunicabilidad del arte con la inteligibilidad de la ciencia. Wagensber ve mucho más claramente que otros la relación entre las dos culturas. Pero el científico retorna: "En un mundo habitado por seres de complejidad tal, resulta imposible conocer un objeto de complejidad tal más uno". La transmisión del estado de ánimo del artista se vale de expresiones que, si son eficaces, son equivalentes a lo que pretende el lenguaje científico. Se comprende que la pretendida "objetividad" de la ciencia sea discutida; pero, de una u otra forma, el hombre se encuentra en los dos extremos del problema.

El capítulo 7 (19 páginas) discurre "Sobre utopías e ideologías" y trata de la evolución del hombre, una marioneta que cree tener la facultad de tirar de los hilos para representar su propio drama. El hombre inventa ideologías y confecciona utopías, la referencia necesaria para una retroalimentación ("feedback") más o menos sostenida y así capaz de creerse sujeto de una historia. "La utopía es algo necesario para que el presente vibre", dar finalidad a la existencia, el "telos", un poco en el sentido de Paul Tillich, con sus aspectos positivos de fecundidad y poder, contra los aspectos negativos de falta de verdad, que llevaría consigo la esterilidad y la impotencia. Sin embargo, una fe común resulta un procedimiento muy apropiado para conseguir un comportamiento coherente, del que se puede esperar "algo". Este punto de vista es profundamente biológico; los ritmos dan a los organismos poder de anticipación, y la esperanza de algún futuro, incluyendo en ello un comportamiento "racional", aumenta las probabilidades de que algún futuro se realice. Todo esto conduce a debatir las relaciones entre la ética y las ideologías, tema realmente ambicioso que, como se puede anticipar, resta inconcluso. "Las ideologías siempre han tendido a subir y a caer traumáticamente... La historia no puede empezar ahora... La tolerancia de los hombres para con los hombres es la mejor virtud a la hora de elaborar proyectos comunes". Evidentemente, la evolución no es la felicidad, ni la virtud. (R. M.)

A CONCISE INTRODUCTION TO THE THEORY OF NUMBERS, por Alan Baker. Cambridge University Press; Cambridge, 1984. La teoría de números es el campo de la matemática que se ocupa de las propiedades de los números naturales. Para los profesionales, desde los pitagóricos hasta nuestros días, la teoría de números ha sido siempre la "reina de las matemáticas", como Gauss la llamó.

En la teoría de números se manifiesta de una forma esplendorosa la profunda unidad de la matemática. En el desarrollo actual de la teoría de números intervienen de forma decisiva el álgebra, el análisis real y complejo, la geometría e incluso los métodos probabilísticos. Y en esta interacción profunda de los diversos métodos matemáticos se pone de manifiesto con nitidez

un hecho llamativo que produce inevitablemente una sensación de misterio. Teoremas en cuyos enunciados no intervienen sino los más sencillos conceptos relativos a los números naturales, tales como ser primo, ser expresable mediante sumas de tales o cuales potencias de números naturales, etcétera, sólo pueden ser establecidos a través de la puesta en acción de complicadas herramientas del análisis, de la geometría algebraica o de otros campos, de las que ni en las hipótesis ni en la tesis del teorema aparece la traza más remota. Parece difícil explicar cómo es que el mecanismo cognoscitivo del hombre necesita, para establecer la conexión entre una hipótesis y una tesis aparentemente tan cercanas, recorrer vericuetos tan complicados. La simplicidad de los enunciados, la sofisticación de métodos, la unidad y armonía profunda de las ideas que se introducen han atraído extraordinariamente a los matemáticos de todos los tiempos.

La teoría de números es uno de los campos en que abundan los buenos problemas abiertos, aquellos que el hombre de la calle puede entender inmediatamente y sin preámbulo alguno. ¿Es verdad que si n es mayor que 2 la ecuación $n^n + y^n = z^n$ no es resoluble en números naturales x, y, z distintos de 0 y 1? ("teorema" de Fermat). ¿Será cierto que todo número par se puede expresar como suma de dos números primos? (conjetura de Goldbach).

En 1900, aprovechando la ocasión del primer congreso internacional de matemáticos, David Hilbert, uno de los mayores matemáticos de los tiempos recientes, proponía en una conferencia titulada *Mathematische Probleme* una colección de 23 problemas abiertos en diferentes campos de la matemática que, a su parecer, constituían un reto estimulante para el desarrollo de esta ciencia. Los problemas de Hilbert han señalado efectivamente el camino de desarrollo de la matemática en lo que va de siglo. La solución de algunos de ellos ha modificado profundamente incluso la concepción filosófica de la matemática y del conocimiento humano. Tal es la inesperada solución por Kurt Gödel del problema 2 de Hilbert, con la demostración de la imposibilidad de establecer la ausencia de contradicción de la aritmética dentro del mismo sistema formal. Asimismo, la solución del problema 1 sobre la potencia del continuo por Gödel y Paul Cohen ha puesto de manifiesto la posibilidad de establecer teorías de conjuntos cantorianas (en que es axioma que no existen conjuntos de potencia intermedia entre la de los números naturales y la de los reales) y teorías de conjuntos no cantorianas (en las que es axioma lo contrario).

De los problemas de Hilbert hay cuatro (7, 8, 9, 10) que se refieren muy directamente a la teoría de números. De dos de ellos (7 y 10) se ha ocupado con gran éxito el autor del libro que comentamos, Alan Baker. Por sus trabajos profundos en la obtención de cotas efectivas de soluciones de ciertas ecuaciones diofánticas y por sus teoremas relativos a la transcendentalidad de amplias clases de números obtuvo en 1970 la medalla Field, la más alta distinción internacional que la comunidad matemática conoce.

Dada la autoridad de Alan Baker, la exposición introductoria y concisa (95 páginas) a la teoría de números que presenta es extraordinariamente interesante tanto para la comunidad matemática en general como para el lector no profesional suficientemente interesado por tratar de entender algo de este campo tan apasionante. En ella se presentan los rudimentos de la teoría, pero al mismo tiempo cada capítulo acaba con una sección de comentarios y una guía de lecturas que pueden constituir una valiosa ayuda para que el lector cuyo apetito matemático se sienta estimulado, pueda adentrarse más en la teoría.

Tras una bella introducción sobre Gauss y la teoría de números, los capítulos de la obra son los siguientes: 1. Divisibilidad; 2. Funciones aritméticas; 3. Congruencias; 4. Restos cuadráticos; 5. Formas cuadráticas; 6. Aproximaciones diofánticas; 7. Cuerpos cuadráticos; 8. Ecuaciones diofánticas. Los capítulos 6 y 8, en particular, a través de sus notas y comentarios, proporcionan pistas valiosas para seguir algunos de los acontecimientos importantes que están ocurriendo en estos últimos años en teoría de números. Gracias a los trabajos de Faltings, un matemático alemán, publicados en 1983, se sabe ya hoy que para cualquier número n mayor o igual que 4 el número de soluciones de la ecuación de Fermat $x^n + y^n = z^n$ en enteros relativamente primos x, y, z, no es infinito. Es probable que no pase mucho antes de que el "teorema" de Fermat quede demostrado definitivamente. (M. G.)

KEYNES: SU TIEMPO Y EL NUESTRO, por Luis Angel Rojo. Alianza Editorial: Madrid, 1984. Hace unos años era un tópico decir que, en economía, "todos somos keynesianos", es decir, seguidores de John Maynard Keynes, quizás el economista más prestigioso e influyente de nuestro siglo, nacido en Cambridge (Inglaterra) en 1883 y muerto en 1946. Más tarde, las críticas dirigidas a su concepción teórica de la economía y a su manera de entender la política económica pusieron interrogantes a la anterior afirmación. Y, sin embargo, "todos somos keynesianos", al menos en el sentido de que hemos sido educados en la manera keynesiana de ver la economía, hemos bebido en sus obras y utilizamos aún muchos de sus análisis. Hemos ido, afortunadamente, mucho más lejos que él, pero por el camino que él trazó y estudiando los problemas que él identificó. Si ahora, en muchos sentidos, "ya no somos keynesianos", esto no resta mérito a su obra ni interés por su estudio.

Keynes ha vuelto a estar de moda en los últimos años por celebrarse en 1983 el centenario de su nacimiento. El libro que comentamos es el resultado –ampliado– de unas conferencias dadas en los cursos de verano de la Universidad Internacional Menéndez y Pelayo, en Santander, por Luis Angel Rojo, catedrático de la Universidad Complutense y director general del Banco de España, con motivo de ese centenario. Es un buen libro, que recomiendo vivamente a los que deseen conocer las ideas de Keynes. No es sólo una biografía, ni un mero resumen de las doctrinas y propuestas de política de Keynes. Habla de su persona, de sus ideas e intereses, de sus escritos, de su manera de trabajar y de concebir la economía, de sus teorías, del ambiente de su tiempo y de los hechos económicos y políticos que condicionaron sus teorías y sus propuestas de acción. Su lenguaje es sencillo, pero su lectura requiere un cierto conocimiento de economía, no muy profundo.

Del contenido del libro destacaría el análisis en paralelo de los hechos y acontecimientos económicos con el pensamiento de Keynes, mostrando cómo nuestro hombre fue adaptando sus ideas y, sobre todo, sus propuestas prácticas de política, a los acontecimientos, al tiempo que se ponen de manifiesto los puntos débiles de su concepción. Tal es el caso de su excesiva confianza en la élite política para solucionar los problemas económicos mediante complejas operaciones de ingeniería social, en forma de paquetes de medidas muy precisas y flexibles, que conducían a la economía hacia su meta –estabilidad con pleno empleo–, al tiempo que iban corrigiendo, con igual precisión y flexibilidad, las perturbaciones que las propias políticas provocaban. O su excesivo énfasis en el corto plazo, que le llevaba a centrarse en los problemas inmediatos, sin atender a

otros más graves, pero remotos, que acababan condicionando los resultados a corto plazo y aun la misma capacidad de las políticas para resolver los problemas planteados.

Como he dicho antes, el libro es un buen resumen de lo que Keynes decía en cada una de sus publicaciones principales, de cómo pensaba y actuaba en cada época de su vida, de cómo iba cambiando su manera de pensar y de cómo elaboraba el bagaje teórico que necesitaba en cada caso para enfrentarse a los problemas del momento. Como buen ejemplo, véanse las págs. 123-136, donde Rojo resume con gran precisión y claridad el tomo I de *A Treatise on Money*.

El capítulo 7, titulado "Keynes en su tiempo y en el nuestro", sirve de enlace entre el pensamiento de Keynes y la economía que hacemos hoy en día. Su título puede desorientar, si se espera un contraste entre la crisis económica actual y el pensamiento de Keynes. El profesor Rojo, que tiene excelentes análisis de la crisis de los años 70 y 80, no intenta aquí replantearse las opiniones de Keynes a la luz de los acontecimientos recientes –aunque lo haga de modo ocasional–, sino más bien trazar el mapa de las corrientes teóricas que, siguiendo a Keynes o criticándolo, se han desarrollado desde su muerte. La descripción de las distintas escuelas es breve pero clara, y servirá de orientación al estudioso de la macroeconomía y de la teoría monetaria actuales.

A lo largo del libro queda claro en qué medida la política económica seguida en el mundo occidental desde los años 30 fue una política keynesiana. Se aprecian sus aciertos y sus errores: precisamente, la crisis de los años 70 y 80 es el reflejo de un mundo diseñado *à la* Keynes para resolver unos problemas –los de la falta de demanda, propios de la depresión de los 30– y con una determinada concepción de la política, y que entra en crisis cuando aparecen problemas nuevos –perturbaciones del lado de la oferta– que exigen otro planteamiento de política, otras recomendaciones, otra manera de entender la acción de gobierno y, en definitiva, otro diagnóstico. ¿Fue de Keynes la culpa? En parte, sí, por sus preconcepciones acerca de lo que debería hacer la política económica. Y quizá también por el peso que supo dar a su obra, que condicionó decisivamente el trabajo de los economistas en las décadas siguientes. Pero en su mayor parte, no. En todo caso, hemos de buscar la responsabilidad en otros –en sus discípulos– que no hemos sabido acertar en el diagnóstico. (A. Argandoña.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

LA ELECCION DE TECNOLOGIA

INPUT-OUTPUT ECONOMICS. Wassily Leontief. Oxford University Press, 1966.

STRUCTURAL CHANGE IN THE AMERICAN ECONOMY. Anne P. Carter. Harvard University Press, 1970.

THE FUTURE OF THE WORLD ECONOMY: A UNITED NATIONS STÜDY. Wassily Leontief, Anne P. Carter y Peter A. Petri. Oxford University Press, 1977.

INPUT-OUTPUT ANALYSIS: FOUNDATIONS AND EXTENSIONS. Ronald E. Miller y Peter D. Blair. Prentice-Hall, Inc., 1985.

THE IMPACT OF AUTOMATION ON WORKERS. Wassily Leontief y Faye Duchin. Oxford University Press, en prensa.

FUNCION INMUNOLOGICA DE LA PIEL

CUTANEOUS T CELL LYMPHOMA. Jennifer A. K. Patterson y Richard L. Edelson en *The Medical Clinics of North America*, vol. 66, n.° 4, págs. 895-913; julio, 1982.

INTERACTION OF T CELLS WITH THE EPIDERMIS. Jennifer A. K. Patterson y Richard L. Edelson en *British Journal of Dermatology*, vol. 107, n.° 1, págs. 117-122; julio, 1982.

SKIN-ASSOCIATED LYMPHOID TISSUE (SALT): ORIGINS AND FUNCTIONS. J. Wayne Streilein en *Journal of Investigative Dermatology*, vol. 80, suplemento, págs. 12s-16s; junio, 1983.

ACTH Y SU FAMILIA DE PEPTIDOS

NEUROPÉPTIDOS. Floyd E. Bloom en *Investigación y Ciencia*, n.° 63, págs. 30-42; diciembre, 1981.

PRO-OPIOCORTIN: THE ACTH/LPH COMMON PRECURSOR PROTEIN. J. Hope y P. L. Lowry en *Frontiers of Hormone Research*, dirigido por T. B. van Wimersma-Greidanus, págs. 44-61. S. Krager; Basilea, 1981.

STIMULATION OF ADRENAL MITOGENESIS BY N-TERMINAL PROOPIOCORTIN PEPTIDES. F. E. Estivariz, F. C. Iturriza, C. Mc Lean, J. Hope y P. J. Lowry en *Nature*, vol. 297, n.° 5865, págs. 419-422; 3 de junio de 1982.

NEUROENDOCRINOLOGY OF VASOPRESSIN, CORTICOLIBERIN AND OPIOMELANOCORTINS. Dirigido por A. J. Baertschi y J. J. Dreifuss. Academic Press; Nueva York, 1982.

CUMULOS GLOBULARES

GLOBULAR CLUSTERS. Dirigido por D. Hanes y B. Madore. Cambridge University Press, 1980.

STAR CLUSTERS. Dirigido por James E. Hesser. D. Reidel Publishing Company, 1980.

THE DYNAMICS OF GLOBULAR CLUSTERS. Ivan R. King en *The Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, vol. 22, págs. 227-243; 1981.

LOS PRIMEROS ORGANISMOS

THE GENE AS THE BASIS OF LIFE. H. J. Muller en *Proceedings of the Fourth International Congress of Plant Sciences, August 16-23, 1926*, dirigido por B. M. Dugger. George Banta Publishing Company; Menasha, Wis., 1929.

SOME ASSUMPTIONS UNDERLYNG DISCUSSION ON THE ORIGINS OF LIFE. N. W. Pirie en *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 69, artículo 2, págs. 369-376; 30 de agosto de 1957.

SPECULATIONS ON THE ORIGIN AND EVOLUTION OF METABOLISM. Hyman Hartman en *Journal of Molecular Evolution*, vol. 4, n.° 4, págs. 359-370; 1975.

GENETIC TAKEOVER AND THE MINERAL ORIGINS OF LIFE. A. G. Cairns-Smith. Cambridge University Press, 1984.

SEVEN CLUES TO THE ORIGIN OF LIFE: A SCIENTIFIC DETECTIVE STORY. A. G. Cairns-Smith. Cambridge University Press, 1985.

ECOLOGIA SOCIAL DE LOS CHIMPANCES

IN THE SHADOW OF MAN. Jane van Lawick-Goodall. Houghton Mifflin Company, 1971.

THE GREAT APES. Dirigido por David A. Hamburg y Elizabeth R. McCown. The Benjamin/Cummings Publishing Company, 1979.

POPULATION DYNAMICS DURING A 15 YEAR PERIOD IN ONE COMMUNITY OF FREE-LIVING CHIMPANZEES IN THE GOMBE NATIONAL PARK, TANZANIA. Jane Goodall en *Zeitschrift für Tierpsychologie/Journal of Comparative Ethology*, vol. 61, n.° 1, págs. 1-60; enero, 1983.

THE CHIMPANZEES OF KIBALE FOREST. Michael Patrick Ghiglieri. Columbia University Press, 1984.

TOPOLOGIA DE LOS ESPEJISMOS

DIFFERENTIAL TOPOLOGY. Morris W. Hirsch. Springer-Verlag, 1976.

MIRAGES. Alistair B. Fraser y William H. Mach en *Scientific American*, vol. 234, n.° 1, págs. 102-111; enero, 1976.

MULTIPLE GRAVITATIONAL IMAGING BY DISTRIBUTED MASSES. William L. Burke en *The Astrophysical Journal*, vol. 244, n.° 1, parte 2.ª, pág. L1; 15 de febrero de 1981.

SIFONES EN ACUEDUCTOS ROMANOS

VITRUVE: DE L'ARCHITECTURE LIVRE VIII. Louis Callebat. Édition Budé, 1973.

AQUEDUCS ROMAINS. En *Dossiers de l'archéologie*, número 38; octubre-noviembre, 1979.

SIPHONS IN ROMAN AQUEDUCTS. A. Trevor Hodge en *Papers of the British School at Rome*, vol. 51, págs. 174-221; 1983.

JUEGOS DE ORDENADOR

SMART SOAP BUBBLES CAN DO CALCULUS. Dale T. Hoffman en *The Mathematics Teacher*, vol. 72, n.° 5, págs. 377-385, 389; mayo, 1979.

¡AJÁ! PARADOJAS. Martin Gardner. Editorial Labor, Barcelona 1983.

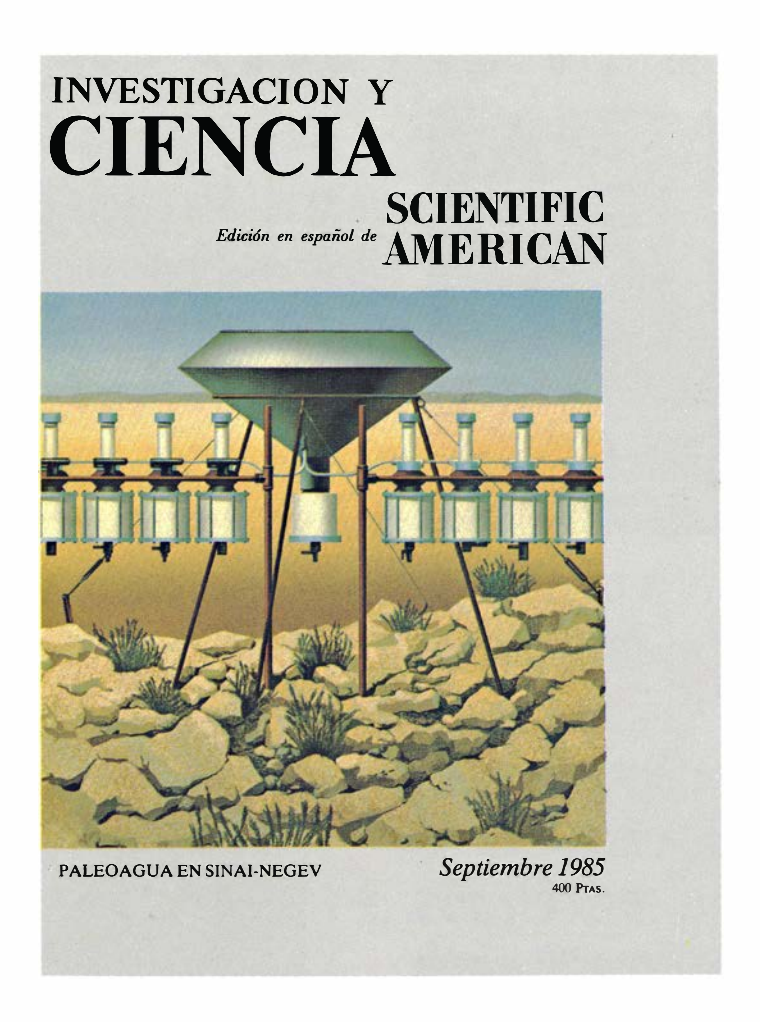
THE COMPLEXITY OF ANALOG COMPUTATION. Anastasios Vergis, Kenneth Steiglitz y Bradley Dickinson. Technical Report No. 337, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Princeton University; febrero, 1985.

TALLER Y LABORATORIO

THE POLARIZATION OF LIGHT AT SEA. E. O. Hulburt en *Journal of the Optical Society of America*, vol. 24, n.° 2, págs. 35-42; febrero, 1934.

REFLECTION OF LIGHT. M. Minnaert en *The Nature of Light and Colour in the Open Air*. Dover Publications, Inc., 1954.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



LOS SATELITES DE URANO, NEPTUNO Y PLUTON, por Robert Hamilton Brown y Dale P. Cruikshank
Cuando el Voyager 2 pase junto a Urano en enero del año que viene, y por Neptuno en 1989, enviará fotografías de sus helados satélites. Estudios del sistema solar exterior sugieren qué podría observar.

LIMITACIONES FISICAS FUNDAMENTALES DE LOS PROCESOS DE COMPUTO, por Charles H. Bennett y Rolf Landauer
¿Qué restricciones gobiernan los procesos físicos de cómputo? ¿Exige cada paso una cuota mínima de energía? Aunque no parece así, permanecen abiertas otras interrogantes.

LA EVOLUCION DEL DARWINISMO, por Ledyard Stebbins y Francisco J. Ayala
La teoría sintética, que durante los últimos 40 años ha constituido el modelo evolutivo comúnmente aceptado, se está gradualmente modificando y ampliando a raíz de los recientes descubrimientos de la biología molecular y de las nuevas interpretaciones del registro fósil.

RECONOCIMIENTO QUIMIOSENSORIAL DE LA INDIVIDUALIDAD GENETICA, por Gary K. Beauchamp, Kunio Yamazaki y Edward A. Boyse
Los genes que regulan las funciones inmunológicas dotan a los ratones de olores característicos. Ello les faculta para distinguir diferencias genéticas entre sus posibles parejas valiéndose sólo del olfato.

PALACIOS MINOICOS, por Peter M. Warren
En el centro de la rica cultura de la Edad de Bronce de Creta se erigía el palacio, que desempeñaba a la vez funciones económicas, políticas y religiosas.

AGUA FOSIL BAJO LA PENINSULA SINAI-NEGEV, por Arie Issar
El estudio del agua que mana de fuentes dispersas por los desiertos del Sinaí y Negev ha permitido identificar un gran acuífero formado durante la última glaciación.

LAS ASCLEPSIAS Y SUS VISITANTES, por Douglas H. Morse
Los insectos y otros animales que frecuentan las asclepsias constituyen una comunidad modelo para el estudio de la interacción entre especies.

DEPOSITOS CRIOGENICOS DE HORMIGON PRETENSADO, por Manuel Elices Calafat
Las propiedades excepcionales del hormigón pretensado a temperaturas criogénicas lo hacen muy adecuado en la construcción de depósitos para almacenar gas natural licuado y otros gases peligrosos o tóxicos.

